



**JORGE BENJAMIM TECNOLOGIAS AVANÇADAS DE
MOREIRA MONTEIRO MICROFABRICO**



**JORGE BENJAMIM TECNOLOGIAS AVANÇADAS DE
MOREIRA MONTEIRO MICROFABRICO**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Prof. Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva, Professor Associado com Agregação, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro e do Prof. Doutor Paulo Jorge da Silva Bártolo, Professor Coordenador, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Politécnico de Leiria.

Dedico este trabalho à memória de minha mãe, ao meu pai e em particular à minha família, pelo apoio e compreensão que me transmitiram ao longo da sua realização.

o júri

Prof. Doutor Francisco José Malheiro Queirós de Melo, Professor Associado,
Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro

Prof. Doutor António Paulo Monteiro Baptista, Professor Associado com
Agregação, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia
da Universidade do Porto

Prof. Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva, professor Associado com
Agregação, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Paulo Jorge da Silva Bártolo, Professor Coordenador,
Departamento de Engenharia Mecânica, Escola superior de Tecnologia e
Gestão, Instituto Politécnico de Leiria

Agradecimentos

Ao professor João Paulo Davim Tavares da Silva pelo seu útil apoio na conclusão deste trabalho e ao Professor Paulo Jorge da Silva Bártolo, pela sua inesgotável capacidade de me apoiar, orientar e incentivar durante esta dissertação.

A todos os colegas do departamento pelo apoio que me deram para concretizar o trabalho proposto nomeadamente ao Joel Vasco, Carlos Mota e Henrique Almeida e Carlos Dias.

À empresa Hugo Damásio na cedência de materiais para a execução dos testes propostos.

À empresa Famolde, nas pessoas do Sr. Joaquim Martins e do Eng.º Pedro Oliveira, pelos equipamentos disponibilizados sem os quais não seria possível a realização deste trabalho.

Ao Professor Geoffrey Mitchell do Centro de Microscopia Avançada da Universidade de Reading, pela utilização dos meios necessários á execução dos ensaios microscópicos das peças maquinadas.

À Fátima pelo seu constante apoio, compreensão e incentivo no cumprimento dos objectivos a que me propus durante a realização deste trabalho.

palavras-chave

Microfresagem laser, Taxa de remoção de material, Grafites, Cobre e Titânio, Rugosidades

resumo

A miniaturização de componentes e sistemas incorporados nos mais diversos ramos da indústria, aplicações médicas e domésticas têm vindo a ser uma realidade nas duas últimas décadas. A constante evolução das técnicas de microfabrico e de materiais tem criado novas aplicações, mais complexas, mais eficazes e mais ambiciosas no que diz respeito ao futuro. A massificação destes mini, micro e nanosistemas depende muito da capacidade de replicação dos seus componentes. Com este trabalho de investigação pretende-se estabelecer uma relação entre os parâmetros operatórios do processo de microfresagem laser e o acabamento das superfícies obtidas garantido taxas de remoção elevadas. Os parâmetros operatórios a considerar são a frequência de impulso, velocidade de varrimento e estratégia de varrimento. Os materiais objecto de análise são o titânio, cobre electrolítico e grafite de diferentes densidades.

keywords

Laser micro milling, Material remove rate, Graphite, Copper, Titanium, Surface roughness

abstract

The miniaturization of components and systems built on different branches of industry, medical and domestic applications has been a reality in the last two decades. The constant evolution of microfabrics techniques and materials has created new applications, more complex, more effective and more ambitious with regard to the future. The mass of mini, micro and nano systems depends very much on the ability of replication of its components.

With this research project seeks to establish a relationship between the operating parameters of the laser microfresagem and finishing of surfaces obtained guaranteed high rates of removal. The operative parameters to consider are the frequency of thrust, speed of scanning and scanning strategy. The materials under review are the titanium, electrolytic copper and graphite in different densities.

Índice

Índice	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	vi
Capítulo 1: Introdução	1
1.1 O Microfabrico	3
1.2 Objectivos e estrutura da Tese	10
 Capítulo 2: Estado da arte em Microfabrico	 12
2.1 Processos Substractivos	14
2.1.1 Processos não Litográficos envolvendo ou não ferramentas físicas	14
2.1.1.1 Microrectificação	14
2.1.1.2 Microfuração	19
2.1.1.3 Microtorneamento	20
2.1.1.4 Microfresagem	22
2.1.1.5 MicroEdm	23
2.1.2 Processos Litográficos	25
2.1.2.1 Processo LIGA	25
2.1.2.2 Técnicas Litográficas alternativas	30
2.1.2.2.1 Processso LIGA-UV	30
2.1.2.2.2 Processo LIGA –feixe de iões	33
2.2 Processos Aditivos	33
2.2.1 Processos estereolitograficos	37
2.2.1.1 Processos mono-fotónicos	38
2.2.1.2 Processos bi-fotónicos	43
2.2.2 Microsinterização laser	44
2.3 Processos híbridos	48
2.3.1 Processo UPSAMS	48

Capitulo 3: Microfresagem Laser	51
3.1 Interacção Laser Material	52
3.2 Fresagem Laser como processo de Microfabricao	59
3.3 Vantagens e Desvantagens da Maquinação Laser	59
3.4 Sistema de fresagem laser utilizado	62
Capitulo 4: Resultados Experimentais e sua discussão	65
4.1 Resultados	67
4.1.1 Efeitos dos parâmetros operativos versus taxa de remoção	67
4.1.2 Efeitos dos parâmetros operativos versus rugosidade	76
4.1.2.1 Definições	76
4.1.2.2. Equipamento utilizado para a medição da rugosidade	82
4.1.2.3 Resultados	83
Capitulo 5: Conclusões e trabalhos futuros	105
Referências	108

Lista de Figuras

Figura 1.1: Domínios de aplicação das microtecnologias	.6
Figura 1.2: Sectores de actividade de clientes das microtecnologias	6
Figura 1.3: Aplicações das tecnologias de micro e nanofabrico em diversos sectores industriais	7
Figura 2.1: Árvore de oportunidades comerciais proporcionada pelas micro e nano tecnologias, domínios de investigação multidisciplinar	13
Figura 2.2: Sistema ROBO nano da FANUC	16
Figura 2.3: Microcavidades produzidas pelo sistema ROBO nano	16
Figura 2.4: Sistema de microrectificação desenvolvido por Milton	17
Figura 2.5: Processo microrectificação ELID	18
Figura 2.6: Microferramentas obtidas pelo sistema de microrectificação ELID	18
Figura 2.7: Princípio de funcionamento do sistema de microrectificação ELID	19
Figura 2.8: Microtorno laboratorial	21
Figura 2.9: Abertura de rasgos por microtorneamento	21
Figura 2.10: Execução de roscas por microtorneamento	22
Figura 2.11: Microfresa de 4 arestas de corte	23
Figura 2.12: Fases do processo LIGA raio-X	26
Figura 2.13: Tipos de máscaras utilizadas em função do tipo de material de suporte	27
Figura 2.14: Mecanismos de degradação e cura nos materiais dos processos LIGA	30
Figura 2.15: Fases do processo LIGA-UV	31
Figura 2.16: Criação de modelo CAD 3D	34
Figura 2.17: Geração de um modelo em formato STL	34

Figura 2.18: Fatiamiento do modelo STL (Modelo SLI)	35
Figura 2.19: Ficheiro STL em ASCII (as coordenadas dos vértices dos triângulos e da normal são genericamente representadas por x y z)	36
Figura 2.20: Equipamento de μ -SL através de uma janela de vidro	39
Figura 2.21: Equipamento de μ -SL	40
Figura 2.22: Equipamento de μ -SL com gerador de máscaras dinâmico	41
Figura 2.23: Equipamento protótipo de microestereolitografia em desenvolvimento no CDRSP do Instituto Politécnico de Leiria	42
Figura 2.24: Estruturas obtidas por estereolitografia bi-fotónica	43
Figura 2.25: Sistema de microsinterização em desenvolvimento no Laser Institute de Mittweida	45
Figura 2.26: Componentes obtidos por microsinterização	46
Figura 2.27: Fases do processo UPSAMS	49
Figura 2.28: Imagem de um rotor obtido pelo processo UPSAMS	50
Figura 2.29: Imagem de uma das pás do rotor	50
Figura 3.1: Interação laser-material para pulsos de duração no domínio do femtosegundo e picosegundo	57
Figura 3.2: Interação laser-material para pulsos de duração no domínio do nanosegundo ou superior	58
Figura 3.3: a) Sistema de microfresagem laser DML 40 SI; b) Detalhe da zona de fabricação	63
Figura 3.4: Sistema de medição de coordenadas por contacto ARES 10.7.5 Mot	64
Figura 4.1: Variação da taxa de remoção função da frequência para diferentes profundidades de penetração. Material: EDM1. Velocidade de varrimento: 750 mm/seg	68

Figura 4.2: Variação da taxa de remoção função da frequência para diferentes profundidades de penetração. Material: EDM1. Velocidade de varrimento: 1250 mm/seg	69
Figura 4.3: Mapa de contorno da variação da taxa de remoção função da frequência e da profundidade de penetração. Material: EDM1. Velocidade de varrimento: 750 mm/seg	70
Figura 4.4: Mapa de contorno da variação da taxa de remoção função da frequência e da profundidade de penetração. Material: EDM1. Velocidade de varrimento: 1250 mm/seg	70
Figura 4.5: Variação da taxa de remoção função da frequência para diferentes profundidades de penetração. Material: EDM3. Velocidade de varrimento: 750 mm/seg	70
Figura 4.6: Variação da taxa de remoção função da frequência para diferentes profundidades de penetração. Material: EDM3. Velocidade de varrimento: 1250 mm/seg	71
Figura 4.7: Mapa de contorno da variação da taxa de remoção função da frequência e da profundidade de penetração. Material: EDM3. Velocidade de varrimento: 750 mm/seg	71
Figura 4.8: Mapa de contorno da variação da taxa de remoção função da frequência e da profundidade de penetração. Material: EDM3. Velocidade de varrimento: 1250 mm/seg	72
Figura 4.9: Efeito do espaçamento entre passagens do feixe laser (<i>hatch</i>) sobre a taxa de remoção. Material: EDM3. Velocidade de varrimento: 750 mm/seg, Profundidade de penetração 2 μ m e frequência de 30 kHz	72
Figura 4.10: Efeito do espaçamento entre passagens do feixe laser (<i>hatch</i>) sobre a taxa de remoção. Material: EDM3. Velocidade de varrimento: 1250 mm/seg, Profundidade de penetração 4 μ m e frequência de 40 kHz	73

Figura 4.11: Variação da taxa de remoção com a frequência para diferentes profundidades de penetração. Material: titânio. Velocidade: 300 mm/seg	74
Figura 4.12: Variação da taxa de remoção com a frequência. Material: titânio. Velocidade: 500 mm/seg. Profundidade de penetração: 4 μm	74
Figura 4.13: Variação da taxa de remoção com a velocidade de varrimento para diferentes profundidades de penetração. Material: cobre. Frequência: 15 kHz	75
Figura 4.14: Variação da taxa de remoção com a velocidade de varrimento para diferentes profundidades de penetração. Material: cobre. Frequência: 25 kHz	76
Figura 4.15: Picos e vales num troço de um perfil de rugosidade	77
Figura 4.16: Exemplo de perfil de rugosidade	78
Figura 4.17: Abbott-Firestone e parâmetros de rugosidade	81
Figura 4.18: Rugosímetro Mahr modelo Marsurf M2	82
Figura 4.19: a) Micrografia da superfície do bloco de cobre; b) Micrografia da superfície do bloco de titânio; c) EDM1; d) EDM3	83
Figura 4.20: Generalização da secção transversal correspondente às linhas de marcação laser	84
Figura 4.21: a) Perfil de rugosidade; b) Representação bidimensional do perfil da secção transversal correspondente às linhas de marcação laser	84
Figura 4.22: Coroa de irregularidade superficial em furo criado por um laser com pulso de duração 4 ns em placa de aço de 100 μm	86
Figura 4.23: Marcação efectuada por acção laser utilizando o sistema Lasertec 40 sobre bloco de grafite EDM3	86
Figura 4.24: Variação da rugosidade (R_k) com a frequência para diferentes profundidades de penetração. Material: EDM1. Velocidade de varrimento: 750 mm/seg	87

- Figura 4.25:** Variação da rugosidade (R_k) com a frequência para diferentes profundidades de penetração. Material: EDM1. Velocidade de varrimento: 1250 mm/seg 88
- Figura 4.26:** Variação da rugosidade (R_k) com a frequência para diferentes profundidades de penetração. Material: EDM3. Velocidade de varrimento: 750 mm/seg 88
- Figura 4.27:** Variação da rugosidade (R_k) com a frequência para diferentes profundidades de penetração. Material: EDM3. Velocidade de varrimento: 1250 mm/seg 89
- Figura 4.28:** Variação da rugosidade (R_k) com a velocidade de varrimento para dois conjuntos diferentes de frequências. Material: cobre 89
- Figura 4.29:** Variação da rugosidade (R_k) com a frequência. Material: titânio. Profundidade de penetração: 2 μm . Espaçamento entre linhas de varrimento 10 μm . Velocidade de varrimento 500 mm/seg 90

Figura 4.30: Micrografias da superfície maquinada para a) Profundidade de penetração de 2 μm , frequência de 15 kHz, espaçamento entre linhas de varrimento de 10 μm e velocidade de varrimento de 200 mm/seg.	91
b) Profundidade de penetração de 2 μm , frequência de 15 kHz, espaçamento entre linhas de varrimento de 10 μm e velocidade de varrimento de 300 mm/seg. Material: cobre	
Figura 4.31: Micrografias da superfície maquinada para a) Profundidade de penetração de 2 μm , frequência de 35 kHz, espaçamento entre linhas de varrimento de 10 μm e velocidade de varrimento de 300 mm/seg.	92
b) Profundidade de penetração de 2 μm , frequência de 40 kHz, espaçamento entre linhas de varrimento de 10 μm e velocidade de varrimento de 300 mm/seg. Material: titânio	
Figura 4.32: Morfologia da superfície das cavidades maquinadas em Grafite EDM1 para diferentes condições de processamento	93
Figura 4.32 (continuação): Morfologia da superfície das cavidades maquinadas em Grafite EDM1 para diferentes condições de processamento	94
Figura 4.33: Morfologia da superfície das cavidades maquinadas em Grafite EDM3 para diferentes condições de processamento	95
Figura 4.33 (continuação): Morfologia da superfície das cavidades maquinadas em Grafite EDM3 para diferentes condições de processamento	96
Figura 4.34: Morfologia da superfície das cavidades maquinadas em titânio para diferentes condições de processamento	97
Figura 4.34 (continuação): Morfologia da superfície das cavidades maquinadas em titânio para diferentes condições de processamento	98
Figura 4.35 : Morfologia da superfície das cavidades maquinadas em cobre para diferentes condições de processamento	99
Figura 4.35 (continuação): Morfologia da superfície das cavidades maquinadas em cobre para diferentes condições de processamento	100

Figura 4.36: Descontinuidade superficial observada para uma micro cavidade em cobre maquinada para uma profundidade de 4 μm , espaçamento entre linhas de varrimento de 10 μm , frequência 15khz e velocidade de varrimento de 200 mm/seg 101

Figura 4.37: Partículas esféricas resultantes da resolidificação de material numa micro cavidade em cobre obtida através uma profundidade de 3 μm , espaçamento entre linhas de varrimento de 10 μm , frequência 15khz e velocidade de varrimento de 200 mm/seg 101

Lista de Tabelas

Tabela 1.1:

Principais sectores afectados pelas tecnologias de micro e nanofabrico (Nexus,2000)	5
--	---

Tabela 1.2:

Exemplo de aplicação das microtecnologias	8
---	---

Tabela 2.1:

Características dos actuais sistemas de μ EDM e μ WEDM	25
--	----

Tabela 2.2:

Principais vantagens e desvantagens do processo LIGA-UV relativamente ao processo LIGA raio-X	32
--	----

Tabela 2.3:

Pós metálicos testados em μ SLS	46
-------------------------------------	----

Tabela 2.4:

Coeficientes de absorção dos materiais mais utilizados em sinterização	47
--	----

Tabela 3.1:

Principais características dos lasers utilizados em processos de fabrico	53
--	----

Tabela 3.2:

Parâmetros da máquina	63
-----------------------	----

Tabela 4.1:

Materiais utilizados	66
----------------------	----

CAPITULO 1: Introdução

As alterações que se verificaram nos últimos anos, com a globalização dos mercados e os novos paradigmas da competitividade industrial, estimularam o desenvolvimento das tecnologias de fabrico sem que no entanto se tenham produzido, na generalidade dos processos tecnológicos, alterações significativas da sua estrutura (Rajurkar *et al*, 2006).

Processos de geração de formas, como por exemplo os processos convencionais de maquinagem, mantêm as suas características fundamentais tendo-lhes no entanto sido adicionadas uma maior flexibilidade na utilização e nas formas possíveis de obter, devido à introdução do comando numérico, dos sistemas de substituição automática de ferramentas de corte, do comando adaptativo e de sensores de controlo de processos e equipamentos (Rajurkar e Yu, 2000).

A introdução de novos materiais para ferramentas (cerâmicas reforçadas, nitreto de boro cúbico, cermets) permitiu igualmente alguns avanços importantes no sentido de uma maior produtividade, maior fiabilidade e melhor acabamento (Löhe e Haußelt, 2005; McGeough, 2002). Por sua vez, a utilização destes materiais para ferramentas, bem como as elevadas taxas de remoção de material possíveis de obter e os graus de acabamento que se pretendem alcançar, promoveu a necessidade de se projectarem, construírem e utilizarem máquinas ferramentas de maior precisão, potência e rigidez. Neste sentido, foram desenvolvidas novas guias e barramentos, fusos e porcas de circulação de esferas, técnicas de colagem e montagem de componentes, árvores e guias hidrostáticas, sistemas de accionamento de fusos e sistemas de controlo de posição e de velocidade de translação e rotação, etc. Por seu turno, os processos de reprodução de formas, nomeadamente os de deformação plástica e fundição, continuam sujeitos a limitações naturais, no que se refere à dimensão das séries, sendo possível um aumento de flexibilidade do processo apenas de uma forma artificial dentro de limites muito estreitos (Bird e Ross, 2002).

Os maiores desenvolvimentos ao nível dos processos convencionais de fabrico têm surgido nas operações periféricas como sejam o fabrico das ferramentas e a sua substituição automática. De referir neste âmbito o desenvolvimento das técnicas de forjamento radial flexível NC e da laminagem de anéis e discos. O reconhecimento da eficácia revelada pelos novos processos de maquinagem, nomeadamente a electroerosão por penetração e com fio conduziu à sua utilização intensiva em várias indústrias das quais se salientam as dos moldes, cunhos e cortantes. A electroerosão planetária constitui um passo importante no sentido da flexibilização, uma vez que combina um processo de geração de formas (promovido pelo movimento planetário ou orbital do eléctrodo) com um de reprodução, típico de electroerosão por penetração (Sommer e Sommer, 2005).

Adicionalmente, foi possível obter diferentes estados de acabamento superficial através da mesma máquina, utilizando o mesmo processo, inclusive para materiais tratados termicamente. Tais desenvolvimentos surgiram como consequência natural da aplicação do comando numérico. A aplicação do laser à soldadura, corte e tratamento superficial e o desenvolvimento de novos processos de corte, como por exemplo com jacto de água, constituem também novos avanços dos processos de fabrico (Kalpakjian e Schmid, 2001).

Nos últimos anos, verificou-se igualmente um aumento significativo do número de funções que um dado produto tecnológico deve possuir. Exemplos significativos desta tendência são os sistemas de leitura de música tipo IPOD e os telemóveis cada vez mais compactos e multifunção. Esta compactação, conduziu não apenas à necessidade de se diminuírem as dimensões dos dispositivos electrónicos mas também dos dispositivos mecânicos. Estas exigências em termos da miniaturização têm conduzido ao desenvolvimento das tecnologias de microfabrico.

Como esta tendência se manterá e incrementará dada a crescente exigência dos mercados em termos do aumento do grau de portabilidade e eficiência de utilização de espaço, as tecnologias de microfabrico serão cada vez mais relevantes no futuro (MINAM, 2008).

De acordo com Masuzawa e Tönshoff (1997), o termo microfabrico designa um conjunto de tecnologias produtivas capazes de produzirem estruturas com dimensões entre 1 μm e 999 μm . Mais recentemente, o World Technology Evaluation Center (WTEC) num relatório sobre microtecnologias, designa microfabrico como as tecnologias destinadas à produção de componentes tridimensionais de elevada precisão numa grande variedade de materiais e possuindo características dimensionais que variam entre 1 μm e 1 mm (Ehmann *et al*, 2005).

1.1 O Microfabrico

Nos últimos anos a Europa tem vindo reconhecer a relevância que as tecnologias de micro e nanofabrico representam no processo de re-industrialização do espaço europeu (MINAM, 2008). O sector produtivo e industrial deverá transformar-se num sector de elevada tecnologia de modo a recuperar a competitividade através de desafios baseados no princípio do resíduo “zero”, na utilização de princípios de concepção e fabrico eco-eficientes, em estratégias de desenvolvimento de produtos sustentáveis e de elevado valor acrescentado. Para tal, grande atenção em termos de investigação e desenvolvimento tem recaído sobre:

- Desenvolvimento e implementação de modelos industriais de prevenção e controlo de poluição assentes no princípio do fabrico eco-eficiente e em conceitos de sistemas e produção agilizada;
- Incremento do conhecimento e da optimização dos processos avançados de fabrico, integrando conceitos de redução de custos, redução de mão-de-obra e acabamento elevado;

- Modificação das características e das superfícies das ferramentas de produção (moldes) através da aplicação de revestimentos, da maquinaria por laser e da utilização de aditivos nos fluidos dieléctricos ou uso de eléctrodos especiais, tendo em conta os conceitos de redução e reciclagem de resíduos, de sistemas ágeis e da eco-eficiência dos processos;
- Redução do tempo de produção e das tarefas sem valor acrescentado, através da agilização da produção do molde atendendo aos princípios organizacionais e humanos e aos aspectos tecnológicos.

Uma tendência crescente verificada nos últimos anos nos países mais desenvolvidos, prende-se com o desenvolvimento de produtos de escala micrométrica e dos respectivos processos tecnológicos de fabrico. Estes produtos, de elevado valor acrescentado e grau de conhecimento tecnológico têm já hoje um forte impacto em mercados tão importantes como o da saúde, telecomunicações, electrónica e contribuem de forma significativa para a melhoria da qualidade de vida (Ehmann *et al*, 2005). As microtecnologias são hoje utilizadas em diversos sectores de actividade tirando partido das valências proporcionadas por cada uma destas tecnologias, tornando-as transversais na sua aplicação. A análise de mercado efectuada pela NEXUS para o período 2004-2009 (ver Tabela 1.1), ilustra de forma clara os principais sectores económicos que são influenciados pelas tecnologias de micro e nanofabrico e respectivas tendências de investimento. Tal como é indicado na Tabela 1.1 os investimentos devem continuar a crescer estimando-se que correspondam a 20 biliões de Euros em 2010 (NEXUS, 2005).

A Figura 1.1 ilustra os domínios de aplicação das microtecnologias, representando os eixos de desenvolvimento dos microsistemas que já se encontram actualmente disponíveis e de todos aqueles que se virão potencialmente a encontrar num futuro próximo.

Tabela 1.1: Principais sectores afectados pelas tecnologias de micro e nanofabrico (NEXUS, 2000)

	Investimentos em 2004 (Biliões de Euros)	Investimentos esperados em 2009 (Biliões de Euros)
Periféricos de informática e telecomunicações	8.5	13.7
Electrónica de consumo	0.8	5.5
Automóvel	1.3	2.0
Área médica e ciências da vida	0.6	1.5
Telecomunicações	0.2	0.9
Controlo de processos industriais	0.6	0.9
Segurança e defesa	0.1	0.4
Componentes e sistemas para habitações	0.1	0.2

A miniaturização de componentes e sistemas tem desempenhado um papel importante no desenvolvimento tecnológico dos últimos anos. Num curto espaço de tempo a informática de consumo, por exemplo, permitiu o acesso generalizado a computadores com elevadas capacidades de processamento. Actualmente, as unidades centrais de processamento de computadores possuem componentes de dimensões inferiores a 100 nm e mais de 100 milhões de transístores, condensados num microprocessador com poucos centímetros quadrados de área.

No entanto o campo de aplicação das microtecnologias não se limita ao sector da microelectrónica sendo bastante mais alargado tal como se indica na Figura 1.2.

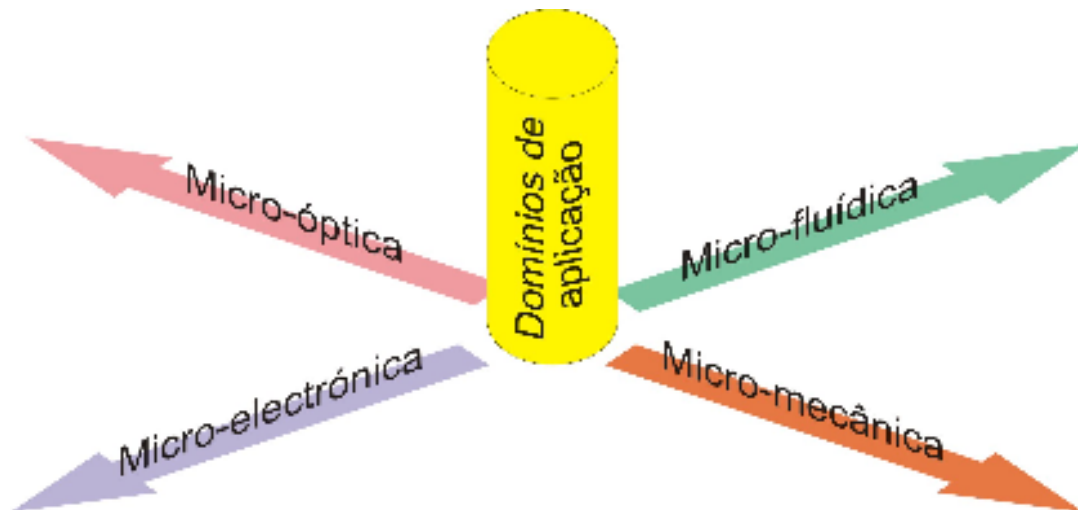


Figura 1.1: Domínios de aplicação das microtecnologias (Vasco, 2007)

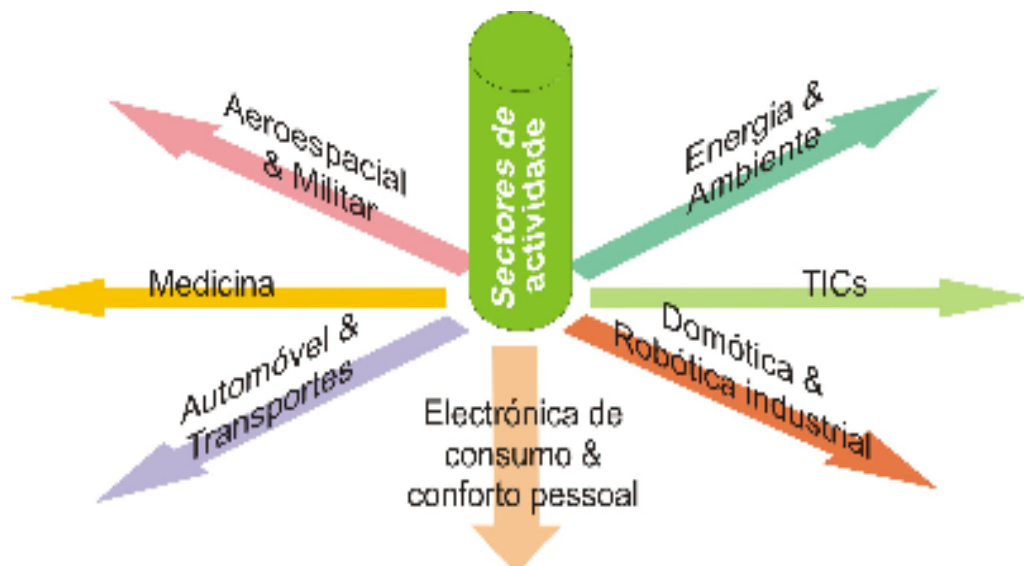


Figura 1.2: Sectores de actividade clientes das microtecnologias (Vasco, 2007).

O número de aplicações é igualmente muito significativo, especialmente em sectores como o automóvel e a medicina (ver Figura 1.3 e Tabela 1.2). O panorama das empresas europeias ligadas às microtecnologias mostra igualmente que a sua maioria são essencialmente PME's, tendo mais de metade delas menos de 20 funcionários. Não obstante esse factor, as taxas de exportação são bastante elevadas, cerca de 60% das empresas europeias que operam ao nível das microtecnologias possuem taxas de exportação dos seus produtos superiores a 50%. Os dados anteriormente apresentados demonstram a importância da micro-fabricação em termos internacionais.

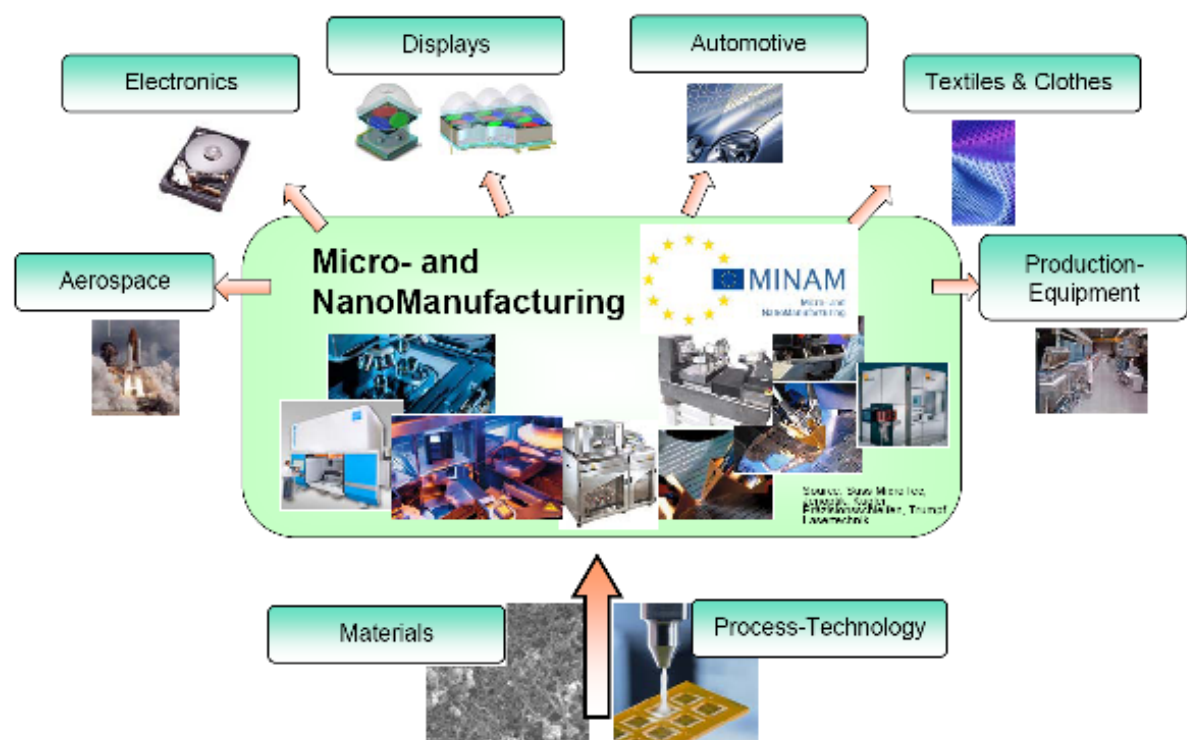
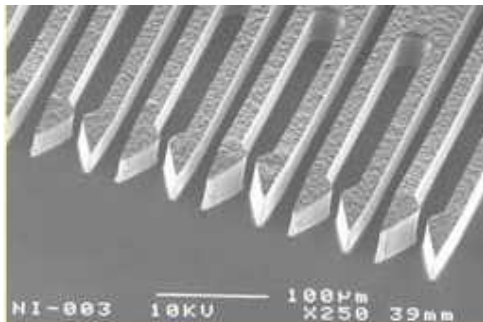

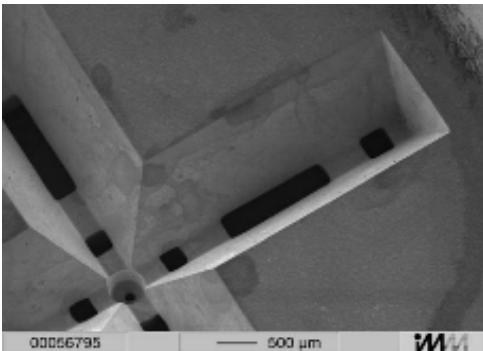


Figura 1.3: Aplicações das tecnologias de micro e nanofabrico em diversos sectores industriais (MINAM, 2008)

Tabela 1.2: Exemplos de aplicação das microtecnologias

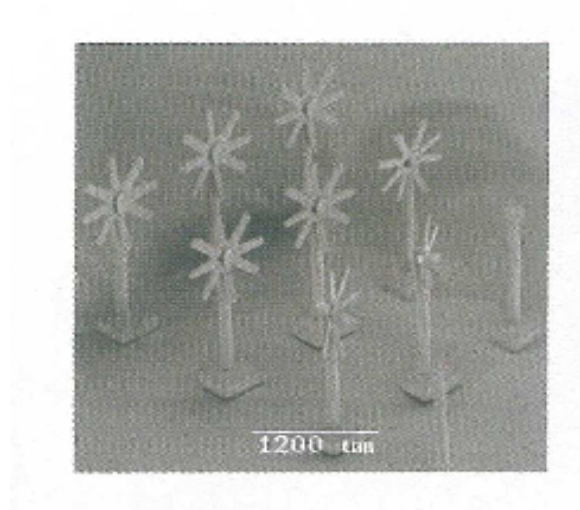
Sector	Exemplos de Aplicação	Imagens
	Microinterruptores, micro-conectores, sensores airbag	
Automóvel	Micromotores	
	Microválvulas, microdispositivos de análise de fluidos, microcélulas de combustível	

Relojoaria

Microcomponentes (rodas dentadas e outros dispositivos)

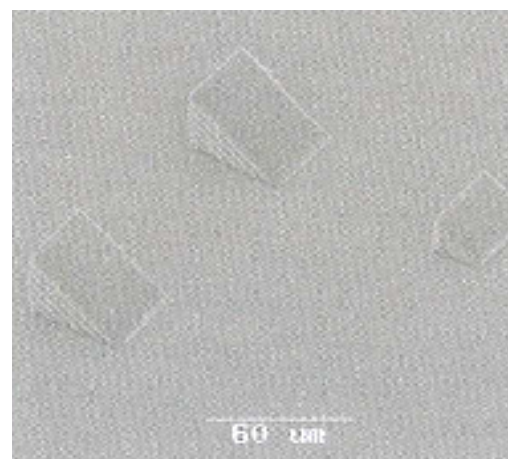


Microactuadores



Domótica

Microlentes, monitores equipados com nano tubos, vidros com películas nano estruturadas para regulação da luz solar



Para Portugal, esta é uma área igualmente importante e que tem merecido grande atenção por parte do tecido industrial, de instituições de ensino superior e de centros de investigação. Um exemplo claro deste interesse é a rede de competências CEMICRO financiada pela Agência de Inovação (www.micromanufacturing.eu). Esta rede visa o desenvolvimento de competências que permitam ao tecido industrial nacional conseguir responder aos desafios actuais dos “novos” Mercados, nomeadamente ao nível da diminuição de tolerâncias dimensionais, da melhoria da qualidade superficial, da miniaturização, manipulação e integração dos componentes. Tal obriga à utilização de novas tecnologias, matérias-primas, à adaptação/criação de processos de fabrico e de novas ferramentas, e à formação de novas competências. É neste sentido que esta dissertação se insere, ao pretender investigar de forma detalhada o processo de microfresagem laser, recentemente introduzido industrialmente em Portugal.

1.2 Objectivos e estrutura da tese

Com este trabalho de investigação pretende-se estabelecer uma relação entre os parâmetros operatórios do processo de microfresagem laser e o acabamento das superfícies obtidas garantido taxas de remoção elevadas. Os parâmetros operatórios a considerar são a frequência de impulso, velocidade de varrimento e estratégia de varrimento. Os materiais objecto de análise são o titânio, cobre electrolítico e grafite de diferentes densidades. O trabalho experimental foi realizado na empresa FAMOLDE (Marinha Grande, Portugal), utilizando um sistema de microfresagem laser DML 40 SI da Deckel Maho. Este sistema que possui seis graus de liberdade para maquinaria está equipado com um laser estado sólido pulsado Nd:YAG de 100 W de potência possuindo um apalpador Heidenhain MT60 para medição de profundidades.

A tese encontra-se dividida em cinco capítulos que descrevem de forma detalhada o trabalho desenvolvido. O primeiro capítulo introduz o tema de dissertação e apresenta os principais objectivos deste trabalho.

Capítulo 2: Estado da arte em microfabrico

Neste capítulo classificam-se os processos de microfabrico em três grandes grupos tecnológicos (aditivos, subtractivos e híbridos), descrevendo-se cada uma das tecnologias existentes. São apresentadas as principais vantagens e desvantagens de cada tecnologia, os materiais tipicamente utilizados e exemplos de aplicação industrial.

Capítulo 3: Microfresagem laser.

O processo de microfresagem é descrito de forma detalhada. O princípio de funcionamento, os principais parâmetros operatórios, as principais vantagens e limitações e exemplos de aplicação são igualmente apresentados.

Capítulo 4: Resultados experimentais e sua discussão.

Os resultados obtidos decorrentes da micromaquinagem de pequenas cavidades em titânio, cobre electrolítico e grafite de diferentes densidades são apresentados neste Capítulo. Apresentam-se igualmente as características dos materiais seleccionados justificando-se a sua escolha assim como a influência dos parâmetros operatórios seleccionados neste trabalho de investigação, sobre a qualidade superficial e taxas de remoção função do material utilizado. Tal estudo permite assim a definição de uma adequada janela de operação função das características do material a processar.

Capítulo 5: Conclusões e perspectivas de trabalho futuro

Os principais resultados obtidos com este trabalho de investigação são sumariados e discutidos neste capítulo onde se apresentam igualmente oportunidades abertas por este estudo e merecedoras de trabalhos de investigação a realizar no futuro.

CAPITULO 2: Estado da arte em Microfabrico

Existe actualmente uma crescente necessidade do aumento do número de funções que um produto industrial deve possuir. Esta tendência tem sido acompanhada por uma miniaturização dos dispositivos quer electrónicos quer mecânicos. Longe vão os tempos em que os únicos microprodutos industriais se destinavam a relojoaria. Por exemplo, depois da introdução dos semicondutores, os circuitos eléctricos tornaram-se bastante compactos contendo dispositivos de dimensões micrométricas. Os circuitos integrados possuem igualmente microfuros, e áreas como a medicina, a biotecnologia e a industria automóvel são actualmente domínios onde a produção de microcomponentes é uma realidade e a sua importância cada vez mais crescente. Dados recentes publicados pelo grupo Fiat mostram que a introdução dos microsistemas no sector automóvel cresceu 20% nos últimos cinco anos e que o seu custo representa actualmente 15% dos custos de um veículo automóvel. No período entre 2005 e 2010 o número de sensores crescerá igualmente 25%. Uma vez que a miniaturização continuará a aumentar à medida que os consumidores exigirem eficiência na utilização do espaço e na portabilidade dos produtos, as tecnologias de micro fabricação serão cada vez mais importantes (Bártolo, 2008). Por outro lado as micro e nano tecnologias, representam um domínio multidisciplinar que está a criar novas oportunidades tal como se pode observar pela “árvore de oportunidades” indicada na Figura 2.1.

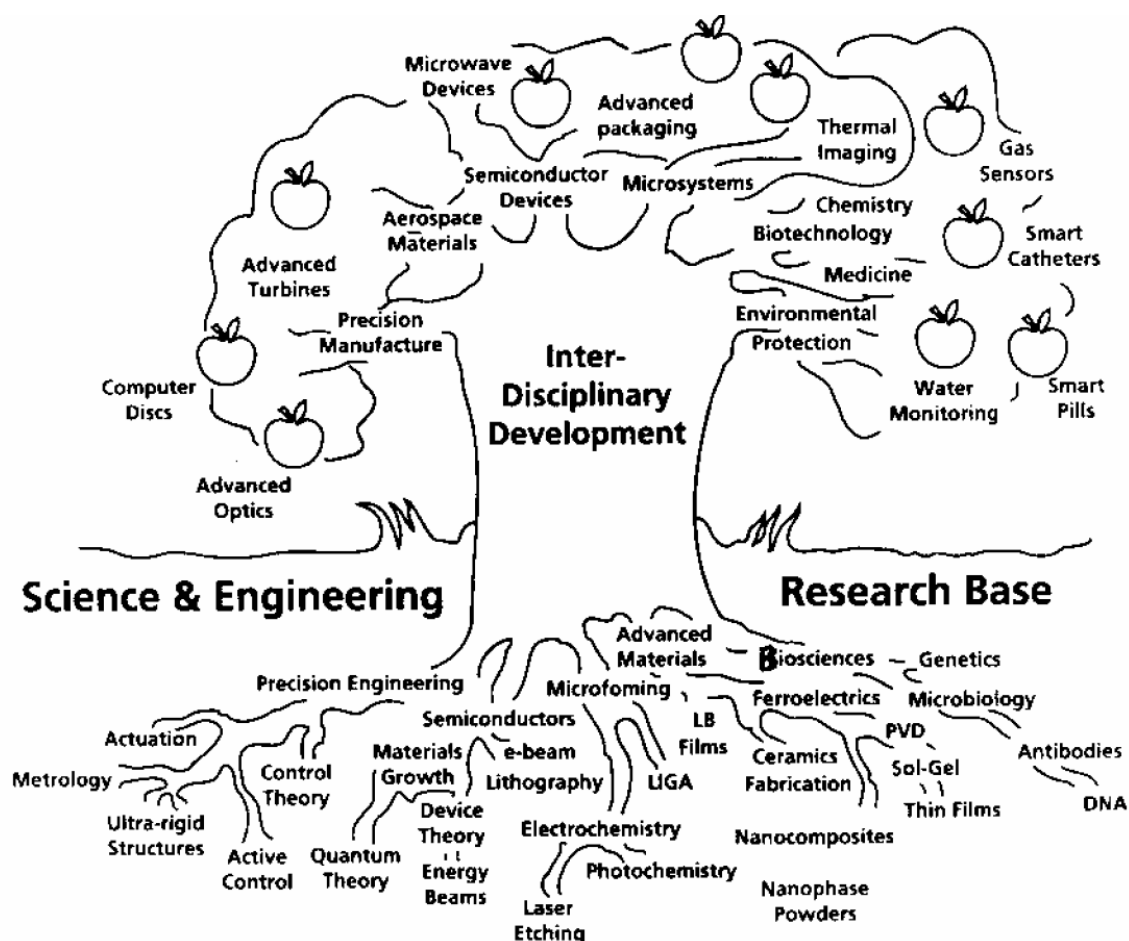


Figura 2.1: Árvore de oportunidades comerciais proporcionada pelas micro e nanotecnologias, domínios de investigação multidisciplinar (Corbett *et al*, 2000)

O termo microfabrico significa literalmente a maquinagem de dimensões entre 1 μm e 999 μm . Contudo como termo técnico significa também maquinagem que não pode ser directamente obtida a partir de métodos convencionais.

De acordo com a comissão técnica dos processos de fabrico físico-químicos da College International pour la Recherche en Productique (CIRP), a variação dimensional considerada para efeitos de micro fabricação situa-se entre 1 e 500 μm .

Mais recentemente um grupo de trabalho de um observatório tecnológico norte-americano, WTEC (World Tecnology Evoluation Center) definiu microfabrico como

a criação de produtos tridimensionais de elevada precisão numa variedade de materiais, possuindo características com dimensões que variam entre as dezenas de micrómetros e alguns milímetros.

Neste Capítulo classificam-se os processos de microfabrico em três grandes grupos tecnológicos:

- Processos substractivos
- Processos aditivos
- Processos híbridos

descrevendo-se de forma detalhada cada uma das tecnologias existentes. São igualmente apresentadas as principais vantagens e desvantagens de cada tecnologia, os materiais tipicamente utilizados e apresentam-se exemplos de aplicação industrial.

2.1 Processos Substractivos

Os processos substractivos de microfabrico classificam-se em:

- Processos não litográficos envolvendo ou não ferramentas físicas;
- Processos litográficos.

2.1.1 Processos não litográficos envolvendo ferramentas físicas

2.1.1.1 Microrectificação

A rectificação tem sido utilizada para a maquinação de pinos e cavidades de pequenas dimensões através da utilização de mós de pequena dimensão. Deste modo a microrectificação difere da rectificação de ultra precisão pela dimensão dos componentes que maquina, permitindo a obtenção de componentes com características geométricas na ordem dos microns.

Não obstante, ambos os processos permitam acabamentos superficiais das peças maquinadas com rugosidades nanométricas. A microrectificação pode ser aplicada no processamento de quase todos os materiais destacando-se os materiais metálicos e os materiais poliméricos. Contudo, o seu principal campo de aplicação é na maquinação de materiais duros e frágeis, devido principalmente à elevada qualidade superficial e também precisão geométrica que esta tecnologia é capaz de alcançar. Estes materiais duros e frágeis são frequentemente utilizados em microóptica destacando-se a título de exemplo o silício e o germânio. Do ponto de vista das máquinas ferramentas existem no mercado várias rectificadoras de precisão mas que não foram concebidas especificamente para microfabrico. Estes sistemas podem ser adaptados ao fabrico de microcomponentes não tendo sido essa no entanto a tendência observada por questões económicas e poupança de espaço.

Recentemente a empresa japonesa Fanuc lançou no mercado um sistema de micro maquinação de elevada precisão designado por ROBO nano (Figura 2.2). Este sistema funciona como um sistema de micro fresagem ou de micro rectificação de alta velocidade possuindo 5 graus de liberdade. O corte é normalmente realizado por uma ferramenta de diamante. O sistema possui um apertado controlo de temperatura (a temperatura é controlada até 0.01°) de forma a eliminarem-se erros térmicos e possui sistemas de deslizamento lineares com resolução de 1 nm e 0.00001° para os eixos de rotação. O sistema ROBO nano tem sido usado para a maquinação de espelhos, filtros, painéis LCD e pequenas lentes. Na Figura 2.3 apresenta-se um conjunto de microcavidades maquinado em bronze possuindo elevada razão de aspecto produzidas com este sistema.

Milton 2006 desenvolveu um sistema de microrectificação para produção de componentes, simétricos e assimétricos a partir de materiais frágeis e duros (Figura 2.4). Este sistema possui 5 graus de liberdade e um sistema de visão para o feedback do processo. Trata-se de um sistema de elevada precisão de modo a minimizarem-se os erros no movimento da bucha e nos eixos da máquina ferramenta para manter estável o contacto entre a peça e a ferramenta.

Os movimentos de elevada precisão são obtidos através de actuadores piezoeléctricos.



Figura 2.2: Sistema ROBOnano da Fanuc

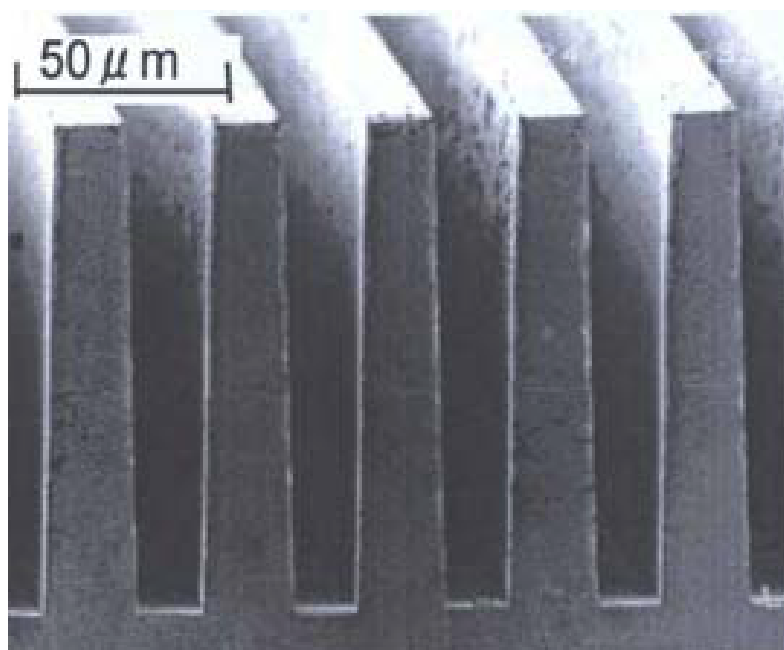


Figura 2.3: Microcavidades produzidas pelo sistema ROBOnano

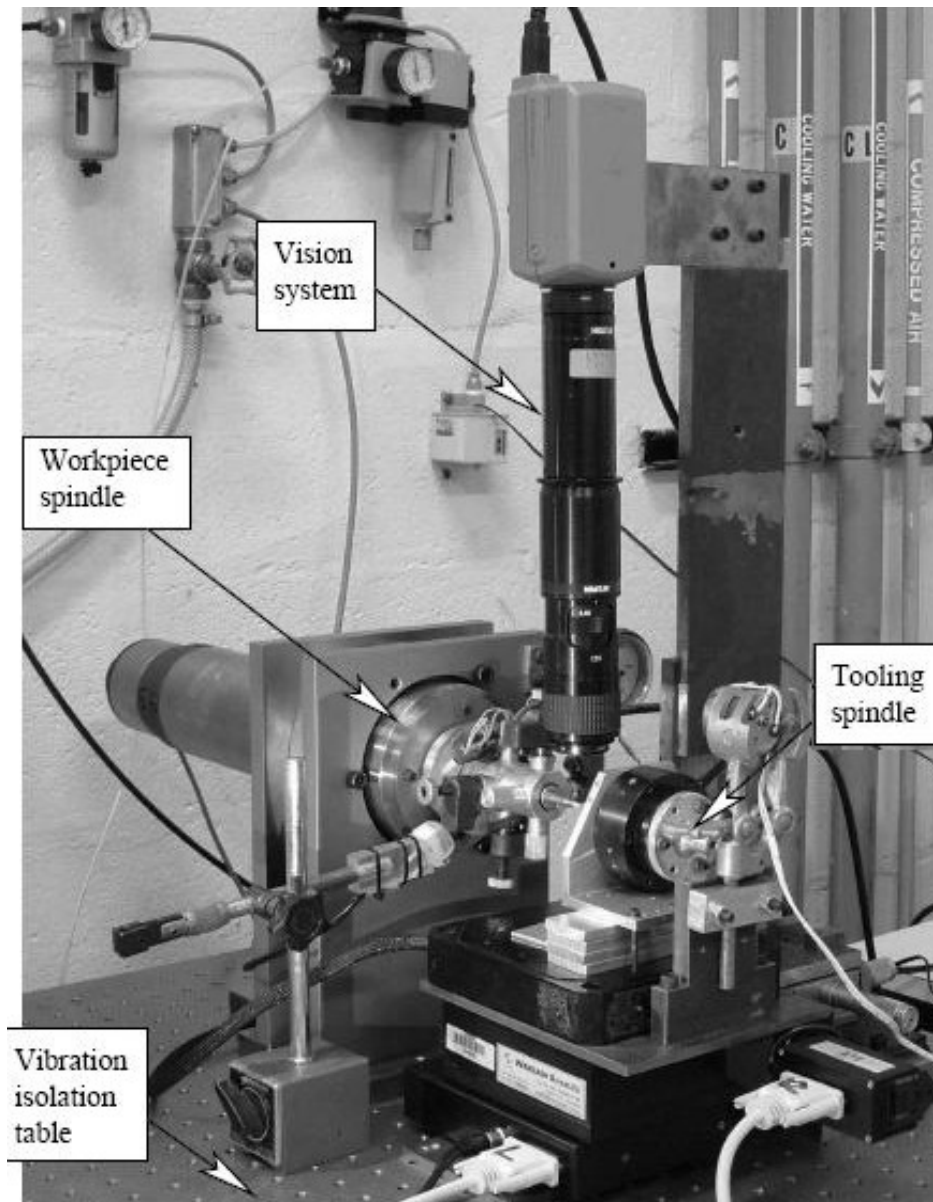


Figura 2.4: Sistema de microrectificação desenvolvido por Milton (2006)

Uma variante do processo de microrectificação é o processo de rectificação com banho electrolítico (ELID, *electrolitic-in-process tracing*). Este processo combina a utilização de abrasivos superfinos dissolvidos numa matriz metálica com um processo de electrólise para manter o nível de afiamento da ferramenta constante (Figuras 2.5 e 2.7). Com este processo conseguem-se acabamentos de superfície espelhados em materiais duros e frágeis.

A técnica ELID tem sido utilizada por exemplo para a produção de pinos com diâmetro final de $50\text{ }\mu\text{m}$ e razão de aspecto 30:1. Tem sido igualmente utilizada para a produção de microferramentas de diferentes formas geométricas (Figura 2.6).

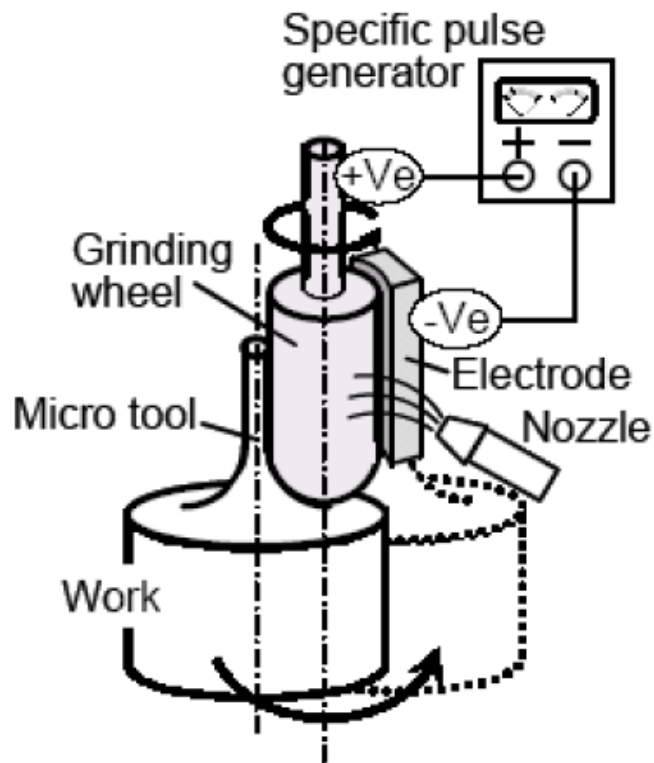


Figura 2.5: Processo microrectificação ELID.

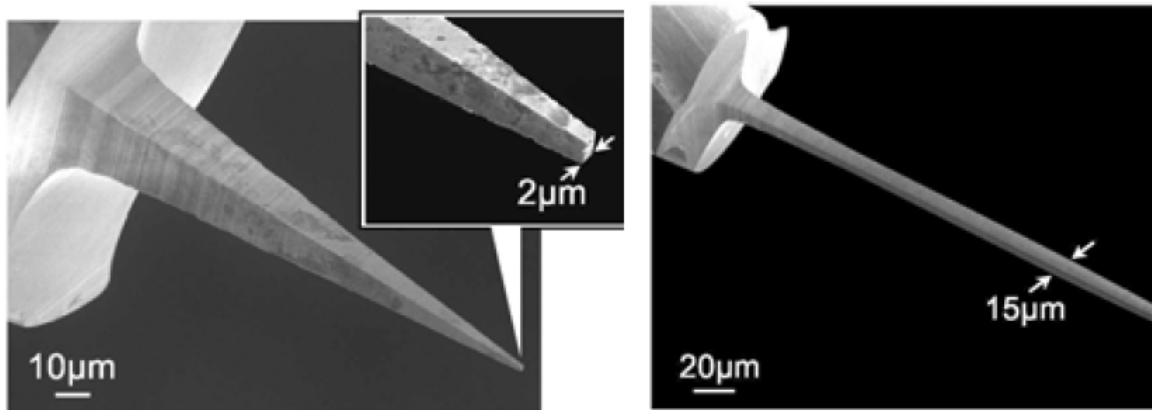


Figura 2.6: Micro ferramentas obtidas pelo sistema de microrectificação ELID.

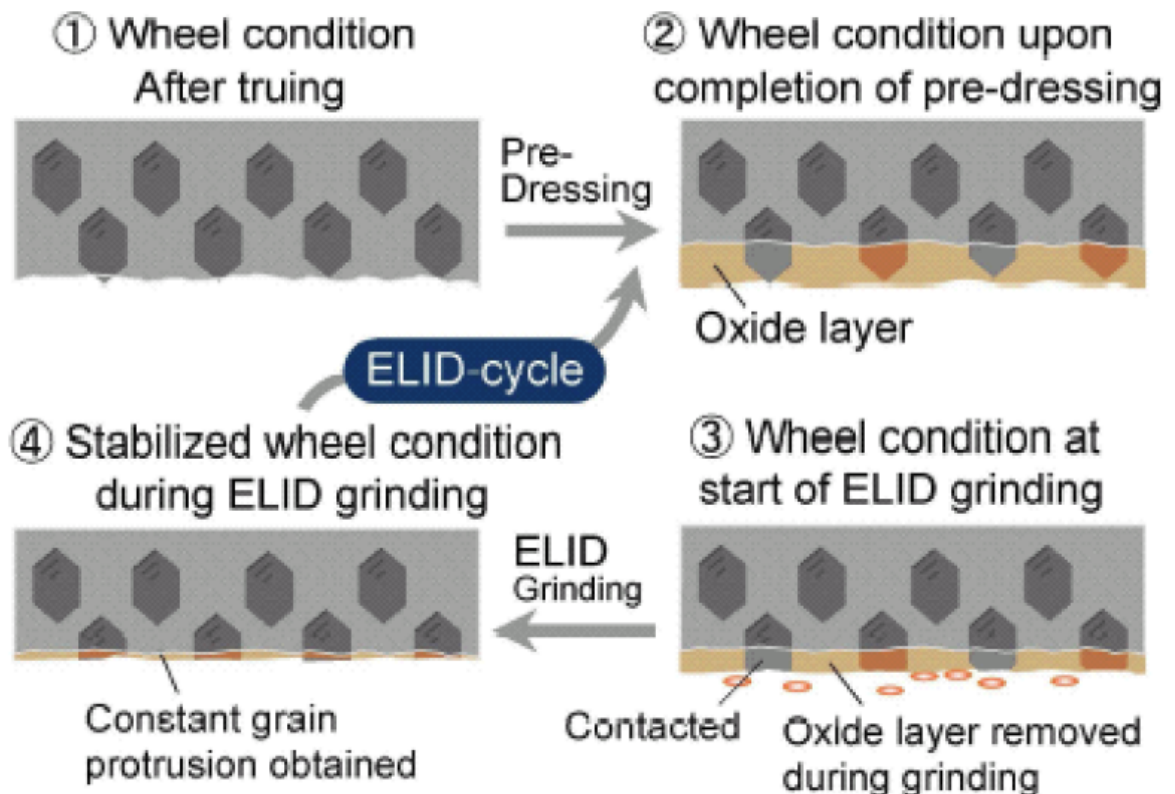


Figura 2.7: Princípio de funcionamento do sistema de microrectificação ELID (Ohmori *et al*, 2003)

O sucesso da microrectificação depende largamente da utilização de ferramentas possuindo pequenos grãos. Neste sentido têm-se desenvolvido mós com grãos submicrométricos em diamante, carboneto de tungsténio e CBN (Nitreto de Boro Cúbico)

2.1.1.2 Microfuração

O processo de microfuração ganhou grande relevância nos anos 1980 através da sua utilização para a produção de micro furos em placas de silício destinadas à indústria electrónica. Trata-se de um processo que permite a produção de furos de paredes direitas com elevada relação comprimento/diâmetro.

Ao contrário das brocas utilizadas na furação convencional, as ferramentas utilizadas em microfuração não apresentam canais helicoidais o que dificulta a remoção das aparas.

Não obstante, é ainda assim possível fabricar ferramentas com canais similares aos das brocas helicoidais convencionais até diâmetros de 50 microns.

A extremidade das microbrocas consiste numa aresta de corte designada por aresta transversal, originada por dois planos de intersecção os quais definem também as duas arestas de corte principais da broca. A aresta de corte transversal remove o material através de um processo de extrusão combinado com a formação da apara por acção de um ângulo de ataque significativamente negativo. A aresta de corte transversal apresenta igualmente um comprimento longo comparativamente com o diâmetro, o que resulta numa força de penetração elevada que se faz sentir ao longo do eixo da ferramenta obtendo-se assim elevadas forças de penetração para um pequeno diâmetro da broca. O ângulo de abertura da broca depende do material a furar. Para materiais duros utilizam-se ângulos de 118° ou 135°. De notar que o ângulo maior promove uma maior rigidez da broca no ponto de furação. Devido ao risco de quebra das microbrocas, o microfabrico tem sido limitada a materiais de baixa resistência mecânica, nomeadamente silício, vidro, alguns cerâmicos e menos frequentemente ligas metálicas.

2.1.1.3 Microtorneamento

Tal como em termos convencionais, o microtorneamento é um processo para peças de revolução que se encontra em grande desenvolvimento. Na Figura 2.8 apresenta-se um sistema laboratorial de microtorneamento desenvolvido por (Lu *et al*, 1999). Com este processo de micromaquinagem é possível obter-se valores R_{max} de 1 μm em operações de contorno. Em operações de abertura de rasgos têm sido obtidos maiores valores de rugosidade (R_{max} de 8 μm) devido à fricção da peça com a ferramenta provocada por velocidades de corte insuficientes (Lu *et*

al, 1999). Estudos das forças de corte e velocidades de corte em microtorneamento, permitiram concluir que a intensidade das forças de corte diminui com o aumento da velocidade de corte (Lu *et al*, 1999).

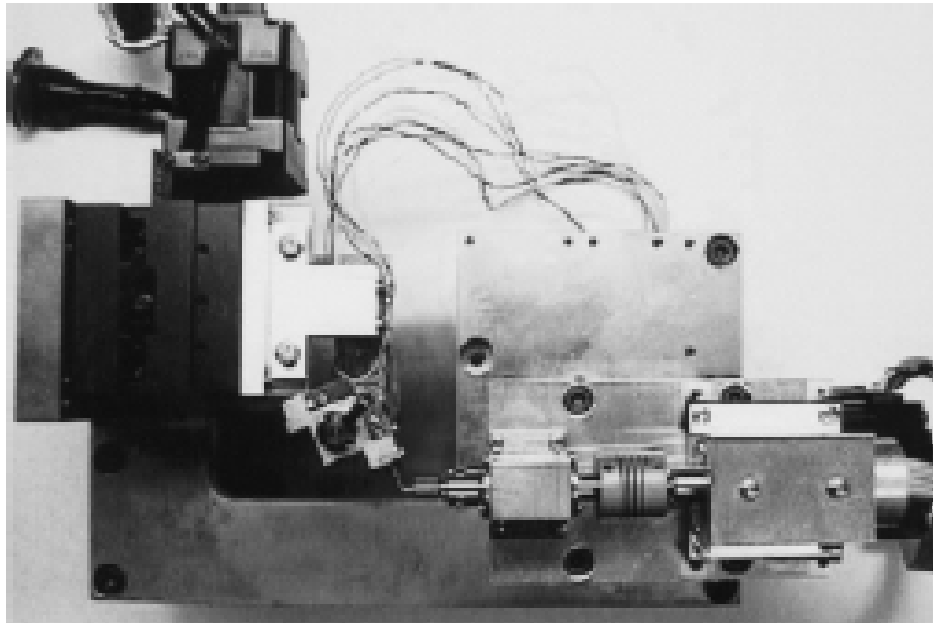


Figura 2.8: Microtorno laboratorial (Lu *et al*, 1999)

Tal como com os sistemas de torneamento convencional, também ao nível do microtorneamento é possível a realização de facejamento, abertura de rasgos (Figura 2.9) e roscas (ver Figura 2.10).

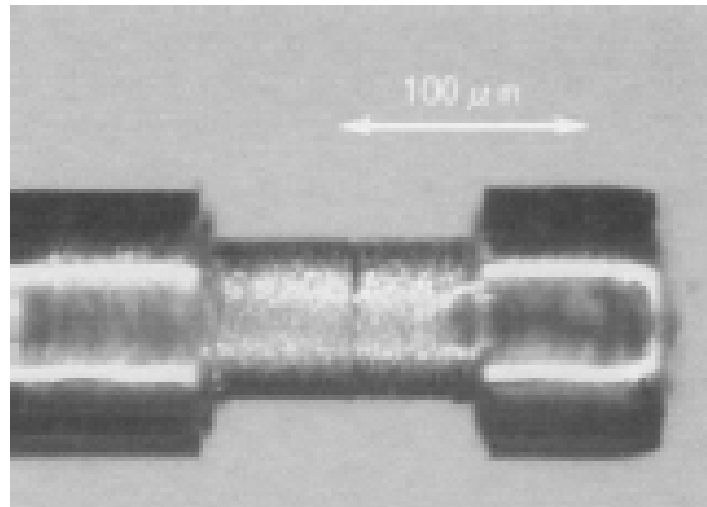


Figura 2.9: Abertura de rasgos por microtorneamento (Lu *et al*, 1999).

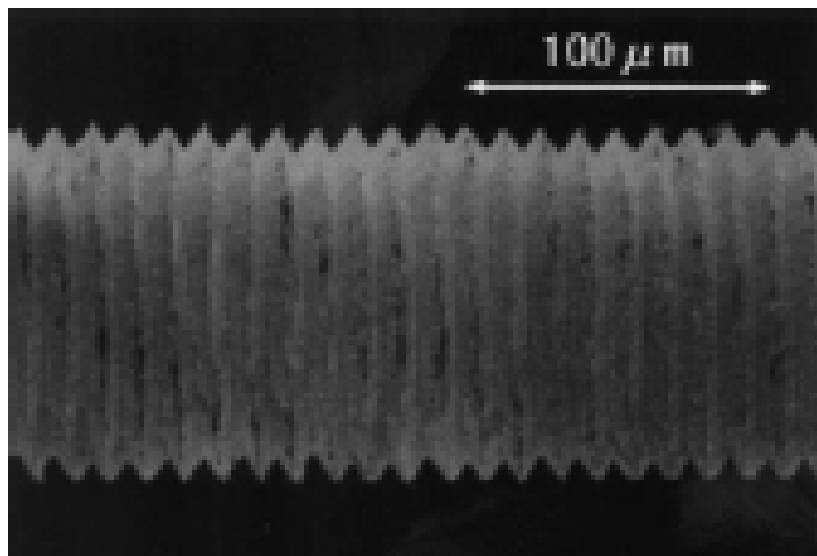


Figura 2.10: Execução de roscas por microtorneamento (Lu *et al*, 1999).

2.1.1.4 Microfresagem

O processo de microfresagem destina-se ao fabrico de pequenas ferramentas com arestas de corte extremamente afiadas e à produção de microcomponentes por remoção de material através de operações de alta precisão e elevada repetibilidade. O processo utiliza ferramentas com diâmetros entre 22 e 100 μm

(Figura 2.11) o que faz com que, à semelhança de qualquer outro processo que utiliza uma ferramenta física de corte por revolução, não seja possível criar cantos vivos interiores.

As principais limitações desta tecnologia são a profundidade máxima de corte que não ultrapassa os 100 μm e a espessura mínima de parede que é possível de realizar, e que não ultrapassa os 8 μm . Todavia, é um processo rápido quando comparado com os restantes processos de microfabrico, capaz de gerar paredes perfeitamente verticais, superfícies com baixa rugosidade, cantos exteriores vivos e geometrias relativamente complexas.

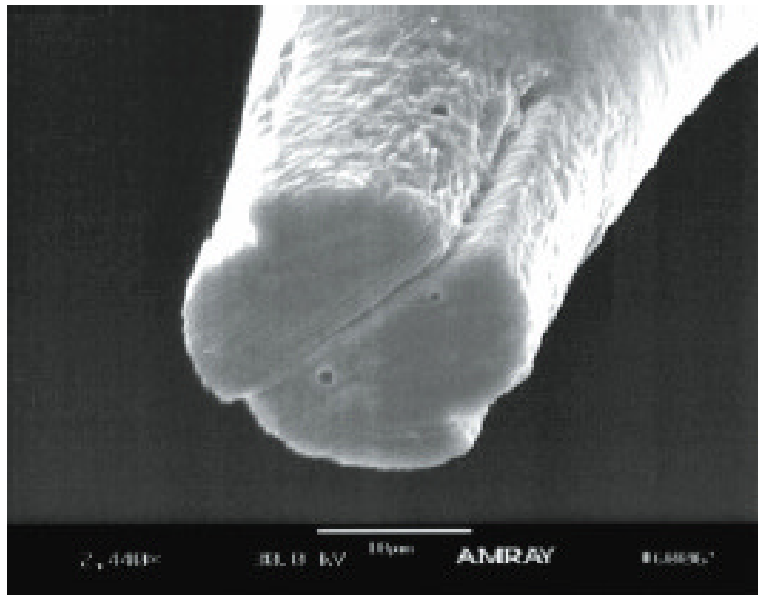


Figura 2.11: Micro fresa de 4 arestas de corte (Friedrich *et al*, 1996).

2.1.1.5 MicroEDM

A electroerosão (EDM) é um processo tecnológico de remoção de material adaptado ao fabrico de formas 3D em materiais muito duros e frágeis, condutores ou semicondutores. A maquinabilidade não depende das características mecânicas a erodir como a dureza e a ductilidade mas da sua condutibilidade eléctrica e ponto de fusão. A ausência de interacção mecânica entre a ferramenta

(eléctrodo) e a peça a produzir, tornam-no num método particularmente importante para micro-fabricação.

O processo de microelectroerosão é caracterizado por:

- energia dos impulsos de aproximadamente de cerca alguns micro joules
- distância eléctrodo peça (gap) inferior a 10 μm
- grandeza das geometrias a maquinar na ordem do milímetro ou inferior ao milímetro
- precisão das superfícies maquinadas inferior 0.5 a 10 μm

Tal como ao nível da erosão convencional também em microerosão existem os seguintes processos:

- microelectroerosão por penetração
- microelectroerosão por fio

A electroerosão por penetração reproduz a forma negativa do eléctrodo a maquinar. As máquinas actuais são dotadas de 4 eixos (X,Y,Z e C interpolados), o que permite maquinar formas mais complexas que a simples reprodução do eléctrodo. Este é fabricado geralmente, a partir de cobre e suas ligas ou grafite.

Na micromaquinagem por electroerosão por fio (microWEDM) utiliza-se um eléctrodo como a forma do fio, em geral em tungsténio com diâmetro até 10 μm , que se desloca através da peça a maquinar como se fosse a geratriz da superfície cónica a gerar. O movimento relativo entre o fio e a peça é controlado por CNC. As máquinas de microWEDM utilizam um sistema de transporte de fio especialmente desenvolvido para fios de pequeno diâmetro com um gerador capaz de controlar níveis de energia baixos.

A Tabela 2.1 apresenta as actuais limitações das tecnologias de microelectroerosão por fio e penetração, ao nível da precisão dimensional, geométrica, estados de superfície e razão de aspecto.

O valor da rugosidade obtida nos processos de microelectroerosão depende em boa medida dos parâmetros tecnológicos utilizados, da configuração do equipamento e das condições de maquinação durante a execução do processo. Alguns valores possíveis com os equipamentos actuais são da ordem de 0.1 μm Ra, existindo no mercado equipamentos que, segundo os fabricantes, permitem valores na ordem de 0.05 μm Ra, quando equipados com geradores e controladores de elevado desempenho.

Tabela 2.1: Características dos actuais sistemas de μEDM e μWEDM

	μWEDM	μEDM
Desvio médio do contorno [μm]	+/-1	+/-2
Precisão de posicionamento [μm]	+/-1	+/-1
Rugosidade Ra [μm]	0.1-0.2	0.2-0.3
Dimensão mais pequena [μm]	20-40	20-40
Razão de aspecto:		
Ribs	20-30	15-25
Canais	60-80	10-25
Furos		10-50
Mais pequena dimensão de eléctrodo [μm]	10	6

A dimensão mínima executável pelo processo de μEDM por penetração está intimamente ligada aos meios disponíveis para o fabrico da ferramenta, isto é, quanto mais pequeno for eléctrodo menor será a dimensão mínima exequível.

Como estas tecnologias utilizam equipamentos de reduzidas dimensões é necessário controlar a atmosfera e o meio onde estas funcionam para garantir elevada estabilidade. Dever-se-á instalar estes equipamentos em locais com controlo da temperatura e humidade e isolar o equipamento das vibrações induzidas pelo ambiente exterior.

2.1.2 Processos litográficos

2.1.2.1 Processo LIGA

Os processos litográficos foram os primeiros a demonstrar as capacidades necessárias ao fabrico de microcomponentes devido à sua elevada precisão. O processo LIGA (Litographie Galvanik Abforming), foi desenvolvido há cerca de 20 anos, pelo Research Center FZK em Karlsruhe (Hornes *et al*, 2003). Este processo (Figura 2.12) utiliza como princípio a radiação de raios-X fornecida por um sincrontrão através de uma máscara colocada sobre um material de suporte. A máscara define a geometria da área sujeita à exposição dos raios-X, o que condiciona o tipo de geometrias que se podem obter por este processo.

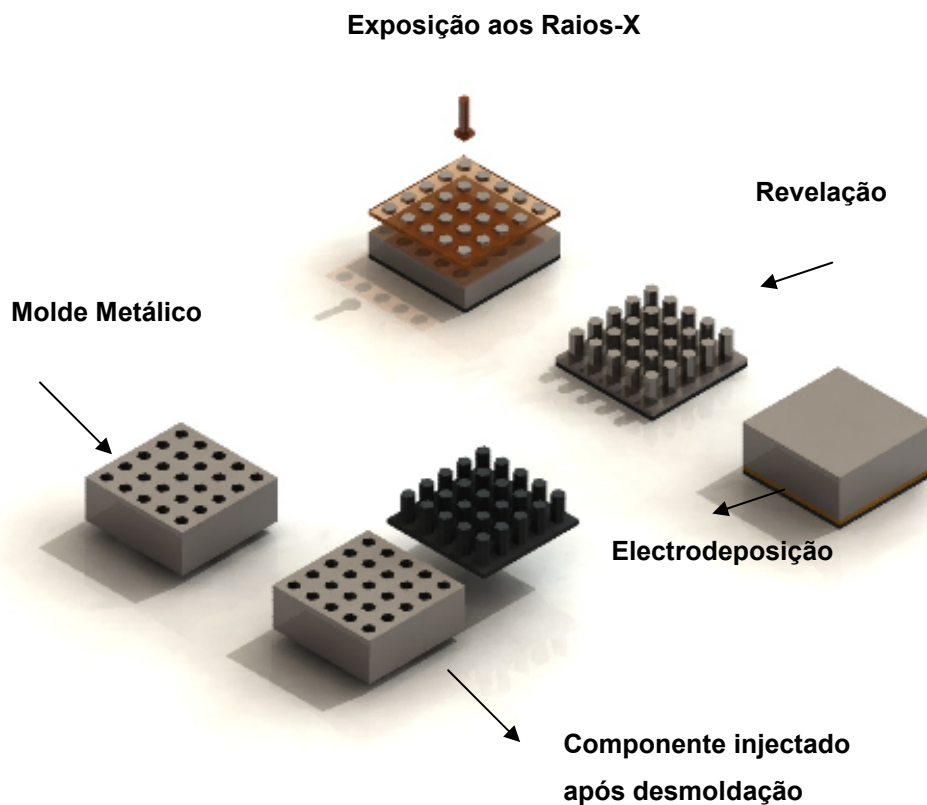


Figura 2.12: Fases do processo LIGA raio-X

Os materiais de suporte utilizados podem ser positivos ou negativos (Nasrullah *et al*, 2004). Designa-se por material positivo (Figuras 2.13 e 2.14) aquele

que, quando exposto à radiação, sofre uma degradação, tornando as áreas expostas solúveis por acção de um revelador. Designa-se por material negativo (Figuras 2.13 e 2.14) aquele cujas áreas expostas sofrem um processo de cura, tornando apenas solúveis as áreas não expostas à radiação.

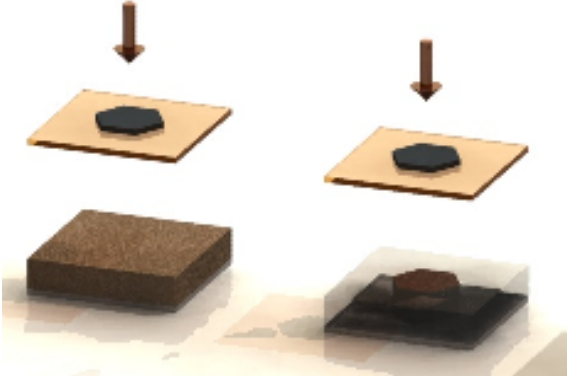
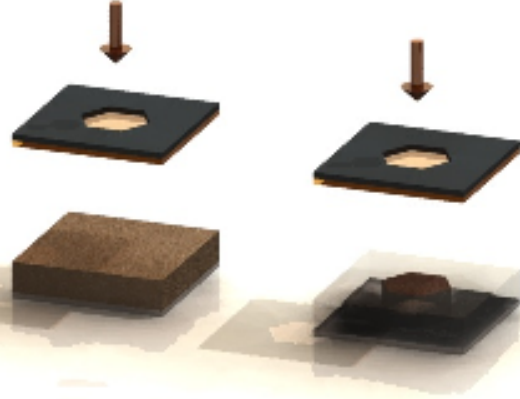
Materiais de Suporte	Mecanismos
Positivos	<p data-bbox="628 553 1158 589">Degradação do material a remover</p>  <p data-bbox="443 1077 1347 1155">As cadeias moleculares são quebradas por irradiação com partículas leves após o que o material exposto pode ser removido pelo revelador</p>
Negativos	<p data-bbox="497 1173 1289 1209">Cura do material pertencente ao micro-componente</p>  <p data-bbox="475 1697 1353 1821">São formadas novas ligações moleculares (ligações cruzadas) o que faz com que as estruturas expostas sejam mais resistentes, fazendo com que o revelador remova o material excedente</p>

Figura 2.13: Tipos de máscaras utilizadas em função do tipo de material suporte

O processo LIGA raio-X apresenta, relativamente a outras técnicas de microfabricação, as seguintes vantagens (Hornes *et al*, 2003; Vasco, 2007):

- Capacidade de obtenção de estruturas com elevada razão de aspecto, até um máximo de 100:1;
- Não existem limitações no que se refere a objectos de secção constante;
- Pode ser utilizada uma grande variedade de materiais (metais, polímeros e cerâmicos);
- Podem ser produzidas geometrias 3D complexas e estruturas parcialmente móveis, recorrendo a sistemas avançados de exposição à radiação e à utilização de materiais de suporte que possam ser sacrificados;

As principais dificuldades inerentes a este processo residem na ainda escassa informação sobre (Vasco, 2007):

- Propriedades e desempenho dos materiais utilizados,
- Relações entre as propriedades dos matérias e os parâmetros de processamento, cujo desconhecimento contribui para as instabilidades verificadas no processo;
- Técnicas necessárias para desenvolver ou modificar “à medida” as propriedades dos materiais a utilizar em aplicações específicas.

A máscara ideal para raios-X consiste num dispositivo que seja transparente aos raio-X e num material disposto em padrão que seja opaco os raio-X. As máscaras devem ainda apresentar as seguintes características:

- estabilidade mecânica;
- compatibilidade com outros equipamentos e processos standard;

- baixo custo.

Tipicamente, o substrato das máscaras para utilização no processo LIGA consiste em folhas de titânio ou de berílio, ou alternativamente em membranas de diamante, silício e nitrato de silício. O material absorvente mais utilizado é a grafite.

Os materiais de suporte devem apresentar as seguintes características:

- elevada sensibilidade aos raio-X;
- estabilidade no processo;
- boas propriedades ópticas;
- boa adesão a outros materiais.

Um dos poucos materiais que cumpre estes requisitos, sendo por isso o mais utilizado, é o polimetacrilato de metilo (PMMA). Este material possui boa adesão a superfícies de óxido de titânio e pode ser revelado selectivamente com o revelador GG (20% tetrahydro-1-4-oxazine, 5% -2-amino-ethanol-1, 60%-2-2-butoxy-ethoxy-ethanol e 15% de água desionizada), sendo igualmente estável durante o processo de fabrico e permitindo resoluções inferiores a um micrometro. Contudo o conjunto PMMA/GG, possui baixa sensibilidade aos raio-X o que exige tempos de exposição mais longos, tornando o processo mais dispendioso. Uma importante alternativa consiste na combinação Poli(Láctidos)/NaOH dado apresentarem uma sensibilidade quatro vezes superior, sendo igualmente biocompatíveis e biodegradáveis, propriedades importantes para aplicações biomédicas. Outros materiais como o Fluoreto de Polivinilideno (PVDF), um polímero com propriedades piezoeléctricas, piroeléctricas e ferroeléctricas e o SU-8, desenvolvido pela IBM, são igualmente utilizados (Cremers *et al*, 2001).

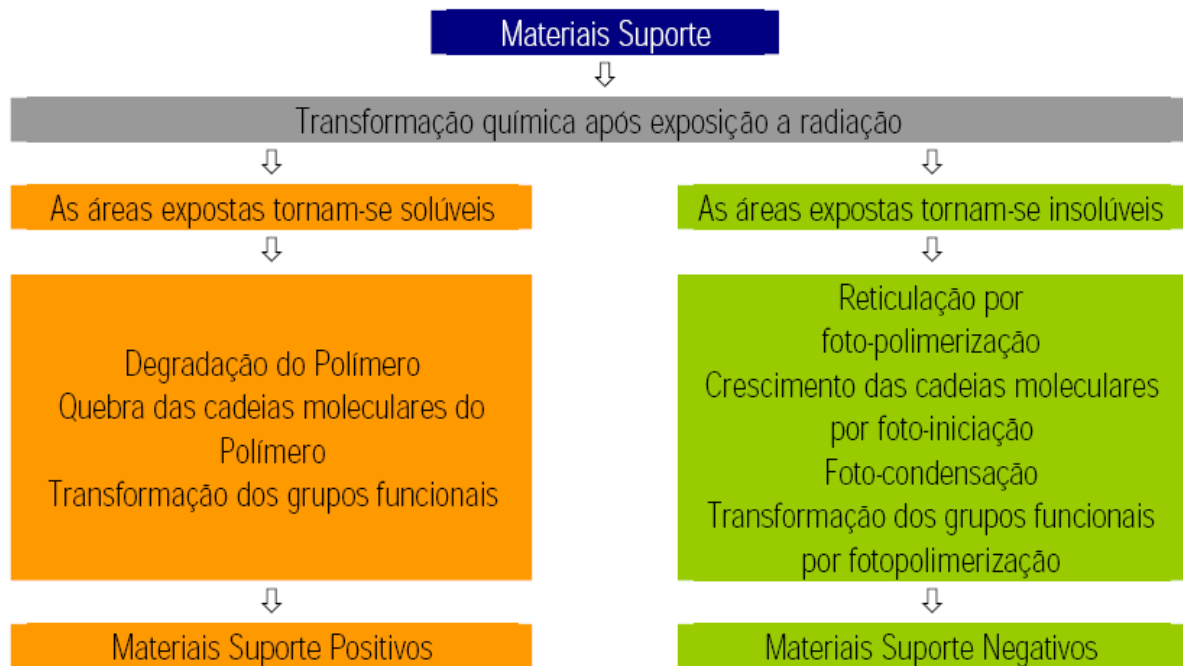


Figura 2.14: Mecanismos de degradação e cura nos materiais suporte dos processos LIGA (Vasco, 2006)

2.1.2.2 Técnicas litográficas alternativas

2.1.2.2.1 Processo LIGA-UV

O processo LIGA-UV é um processo de fabrico de microcomponentes de grande precisão, embora inferior ao processo LIGA convencional, economicamente interessante por utilizar uma fonte de irradiação menos dispendiosa (Bischofberger *et al*, 1997). Tradicionalmente, utilizando-se um material de suporte positivo, o processo compreende as seguintes etapas (Figura 2.15):

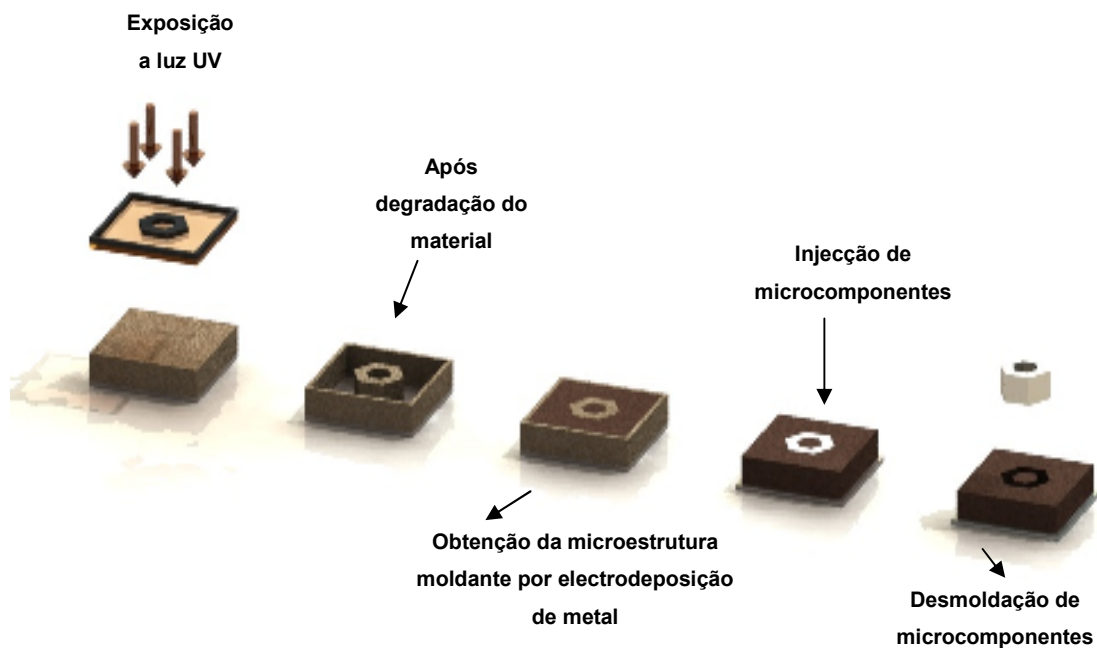


Figura 2.15: Fases do processo à luz UV (Ultra-Violeta)

- o material de suporte é exposto à luz UV (Ultra-Violeta);
- o material suporte degradado pela luz UV é removido;
- os passos anteriores são repetidos várias vezes com outras máscaras para produzir novas geometrias;
- é depositado metal por electrodeposição sobre o material suporte, formando a cavidade do molde;
- o molde metálico obtido é então rectificado e o material suporte é dissolvido, deixando a cavidade vazia;
- o molde está pronto para moldar peças.

As principais vantagens e desvantagens do processo LIGA-UV relativamente ao processo LIGA convencional são apresentadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Principais vantagens e desvantagens do processo LIGA-UV relativamente ao processo LIGA raio-X

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none">• Processo de custo mais reduzido que o LIGA raio-X• As máscaras não necessitam de ser realizadas em materiais absorventes• Os custos associados ao investimento na tecnologia não são tão dispendiosos quanto os custos associados ao LIGA raio-X, pois utiliza uma fonte UV em detrimento de um sincrotrão• Processo com grande variedade de materiais comercialmente acessíveis• Compatível com grande variedade de materiais comercialmente acessíveis	<ul style="list-style-type: none">• Menor resolução que a obtida no LIGA raio-X• Menor razão de aspecto para as peças produzidas

2.1.2.2.2 Processo LIGA-feixe de iões

O processo LIGA com recurso a um feixe de iões é um dos mais recentes desenvolvimentos ao nível das técnicas litográficas (Munnik *et al*, 2003). Neste processo, a acção sobre o material de suporte é realizada com recurso realizado ao bombardeamento com protões, de dimensões submicrométricas (na ordem dos 100nm), sendo em seguida revelado, deixando, no caso de um material de suporte negativo, apenas as zonas afectadas pelo feixe de iões.

A máscara é utilizada essencialmente para perfis 2D viabilizando a realização de estruturas 3D, por via da alteração do ângulo de incidência do feixe sobre o material. Tipicamente, o material a expor está dentro de uma câmara de vácuo onde o feixe de iões incide perpendicularmente à sua superfície. A mesa de suporte do material pode ser controlada de modo a realizar rotações, fazendo assim oscilar o material a expor, criando ângulos de incidência do feixe diferentes do normal à superfície, possibilitando a obtenção de geometrias 3D e aumentando também a razão de aspecto dos componentes fabricados. A altura das micro-estruturas é controlada através da energia do feixe. Tomando como material de suporte o PMMA, conseguem-se alturas entre 14 e 160 μm para energias entre 0.8 e 3.5 MeV.

2.2 Processos aditivos

2.2.1 Introdução

Os processos aditivos de microfabrico envolvem a utilização de lasers emitindo radiação ultravioleta (processos estereolitográficos) ou infravermelha (microsinterização) para a cura de material polimérico ou fusão de material polimérico, cerâmico ou metálico. Em qualquer processo aditivo de fabricação as etapas associadas à construção dos componentes compreendem (Figuras 2.16, 2.17 e 2.18):

- Criação do modelo CAD 3D
- Geração de um modelo em formato STL
- Fatiamento do modelo STL (modelo SLI)
- Criação do componente físico

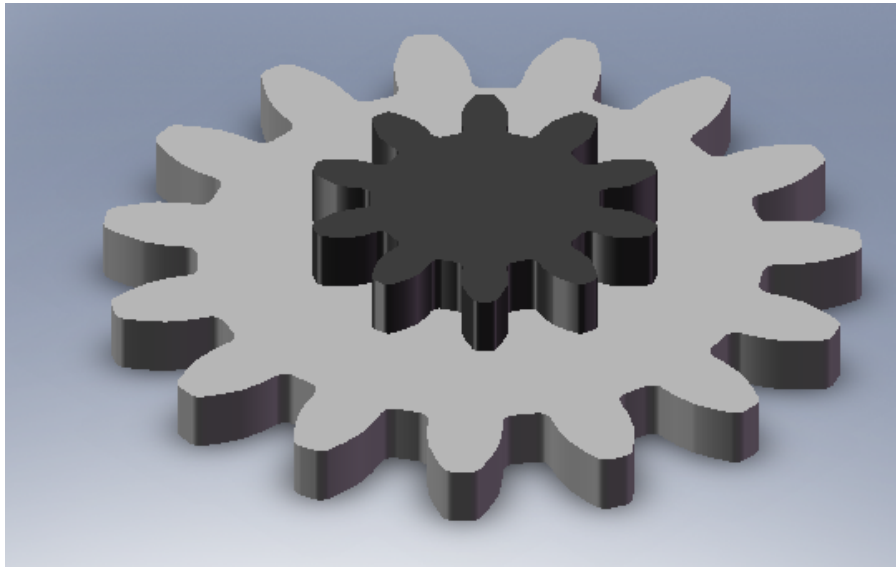


Figura 2.16: Criação de modelo CAD 3D

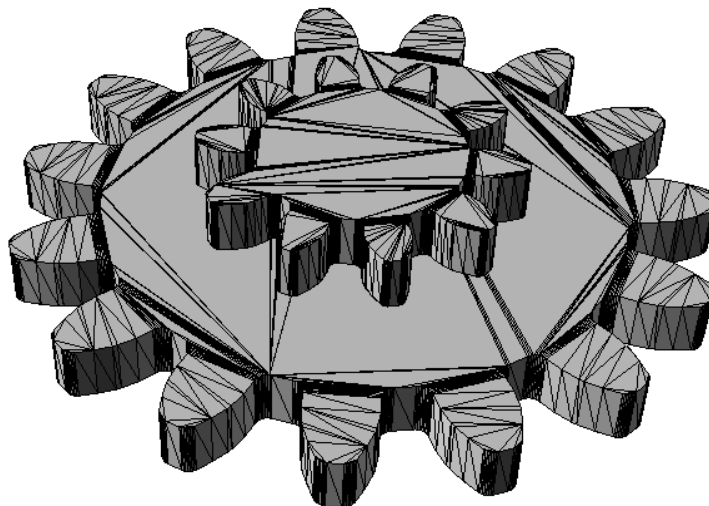


Figura 2.17: Geração de um modelo em formato STL

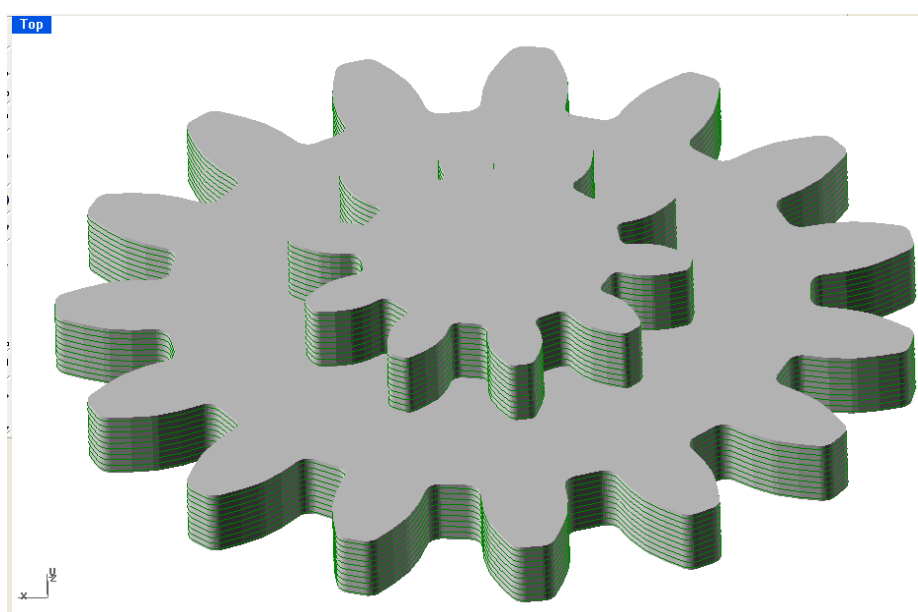
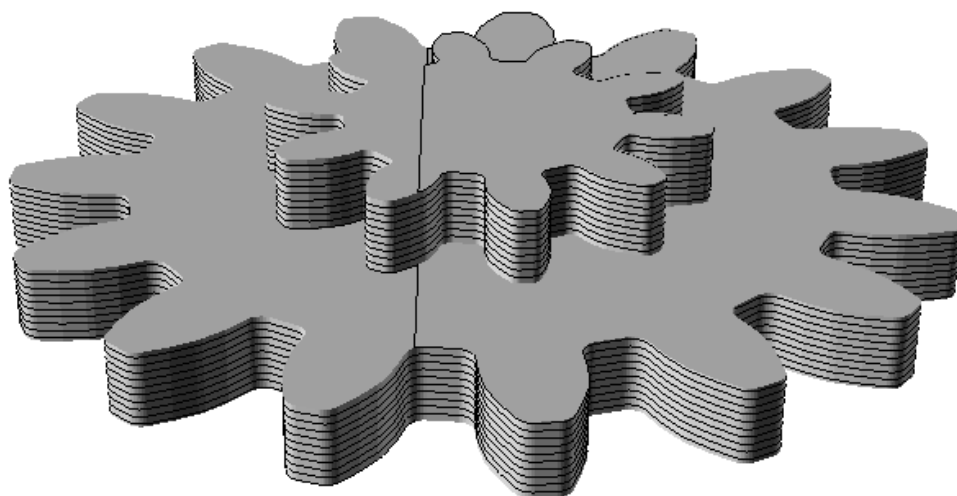


Figura 2.18: Fatiamento do modelo STL (Modelo SLI)

A primeira fase de qualquer processo aditivo de microfabrico consiste na definição de um modelo tridimensional num software CAD/CAM. Uma vez definido o modelo CAD, este deve em seguida ser convertido num modelo formato STL (**STereo-Lithography**) em que as superfícies são descritas através de uma malha de triângulos semelhante a uma rede de elementos finitos.

Os ficheiros STL apresentam-se em dois formatos distintos:

- Binário.
- ASCII (American Standard Code for Information Interchange).

Os ficheiros em ASCII (Figura 2.19) principiam sempre com a palavra **solid** e terminam com a palavra **endsolid**. Entre estas duas palavras é feita a definição dos triângulos através da especificação das coordenadas dos seus vértices. A normal exterior a cada triângulo é um vector unitário que no caso de não estar definido é gerado por forma automática pela maioria dos softwares existentes. Os ficheiros em binário constituem um espelho dos ficheiros em ASCII sendo no entanto mais pequenos do que estes.

```
solid nome
facet normal x y z
    outer loop
        vertex x y z
        vertex x y z
        vertex x y z
    endloop
endfacet
endsolid
```

Figura 2.19: Ficheiro STL em ASCII (as coordenadas dos vértices dos triângulos e da normal são genericamente representadas por x y z)

Após a definição do ficheiro STL deve proceder-se à sua análise, validação e reparação, uma vez que a frequência com que os ficheiros STL são incorrectamente gerados é elevada sendo igualmente numerosos os erros possíveis de ocorrer. O modelo STL é em seguida seccionado em finas camadas, **slices**, representando diferentes secções transversais do modelo e que constituem o chamado ficheiro SLI. A informação contida neste ficheiro vai posteriormente possibilitar a construção do componente final.

2.2.1 Processos estereolitográficos

Os processos estereolitográficos de microfabrico consistem na polimerização ou cura de resinas foto -sensíveis ou termo -sensíveis de baixa viscosidade através da utilização de uma fonte de radiação adequada. A fonte de luz pode ser um laser, sendo a cura feita ponto por ponto, ou uma lâmpada, sendo a cura feita por camada através da utilização de máscaras.

No domínio macroscópico, a estereolitografia (estereolitografia convencional) surgiu na sequência de uma série de trabalhos apresentados nos anos 1970 e 1980 por Swainson (1975, 1977, 1981 e 1982), Fudim (1987 e 1988), Smalley (1988) e Hull (1984, 1986 e 1989). Este último investigador, patenteou o processo de estereolitografia e fundou a empresa 3D Systems que comercializa estes equipamentos.

A estereolitografia convencional consiste na utilização de uma fonte laser emitindo no domínio dos ultravioletas para solidificar, ponto por ponto, a superfície de uma resina líquida. Os pontos solidificados correspondem a pequenos elementos de volume, de perfil parabólico, habitualmente designados por voxel (*pixel* tridimensional). Uma vez solidificada uma camada correspondente a uma secção transversal do modelo 3D, a plataforma de construção baixa um valor igual à espessura da camada seguinte repetindo-se o processo de varrimento laser.

Esta estratégia, correspondente ao método de construção descendente, é utilizada pela generalidade dos construtores ocidentais de equipamentos de estereolitografia. Em alternativa, Hull (1984) propôs também um método de construção ascendente, que é actualmente utilizado pelos fabricantes Japoneses. Neste caso, a irradiação é efectuada através de uma janela de vidro existente na base da tina que contém a resina, sendo o modelo 3D construído de cima para baixo, com elevação da plataforma móvel após a solidificação de cada camada. Em termos práticos, a diferença manifesta-se na necessidade de existência, no método descendente, de um nivelador para reduzir as tensões superficiais do modelo e estabilizar a superfície da resina líquida, uniformizando a espessura da camada, mas que aumenta a complexidade do equipamento e o tempo de construção (Hull, 1984). O mesmo não se verifica no método ascendente, no qual a janela garante a estabilização e regularidade de cada camada de resina. Ao nível microscópico, os processos estereolitográficos classificam-se, quanto ao mecânico de irradiação e iniciação da cura, em processos mono-fotónicos e bi-fotónicos.

2.2.1.1 Processos mono-fotónicos

Os processos estereolitográficos de microfabrico envolvendo mecanismos de irradiação mono-fotónica, vulgarmente designados por microestereolitografia classificam-se em:

- Processos de construção vectorizada.
- Processos integrantes.

Os processos de construção vectorizada compreendem duas técnicas distintas de fabricação:

- Fabricação com superfície constrangida.
- Fabricação com superfície livre

O processo de fabrico com superfície constrangida foi desenvolvido por Takagi (1993) e por Ikuta (1993a, b) (Figura 2.20).

Neste processo cada camada de resina é polimerizada por um feixe laser traçando vectorialmente a secção correspondente a cada camada através de uma janela transparente, mantendo-se o foco de radiação estacionário e deslocando-se a plataforma no plano de construção.

A existência de um adequado sistema óptico permite focar o feixe de radiação em pontos de dimensões micrométricos. Durante a translação da plataforma o feixe luz é ocultado por acção de um obturador evitando-se assim polimerizações indesejadas.

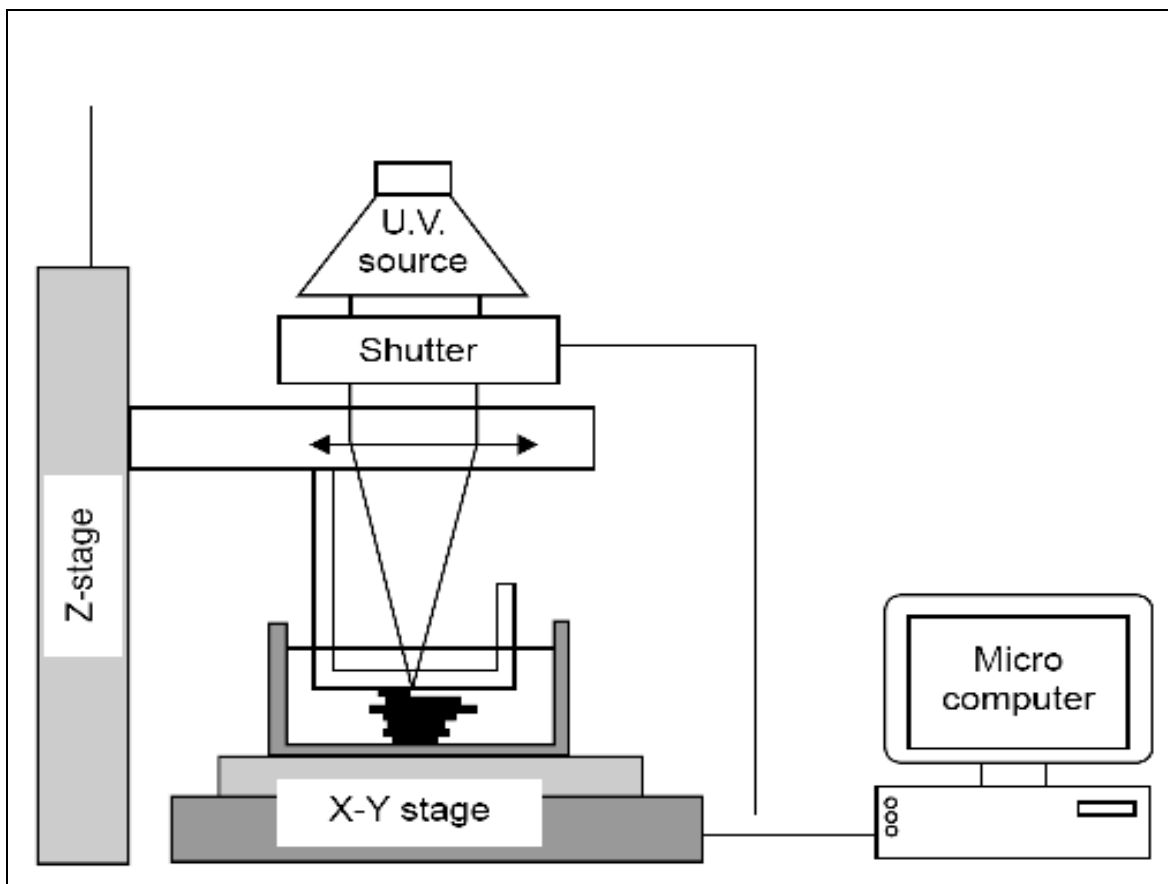


Figura 2.20: Equipamento de μ -SL através de uma janela de vidro (Ikuta e Hirowatari, 1993)

O processo de fabrico com superfície livre é em tudo semelhante ao processo descrito anteriormente, com excepção da superfície da resina líquida não ser constrangida (Figura 2.21).

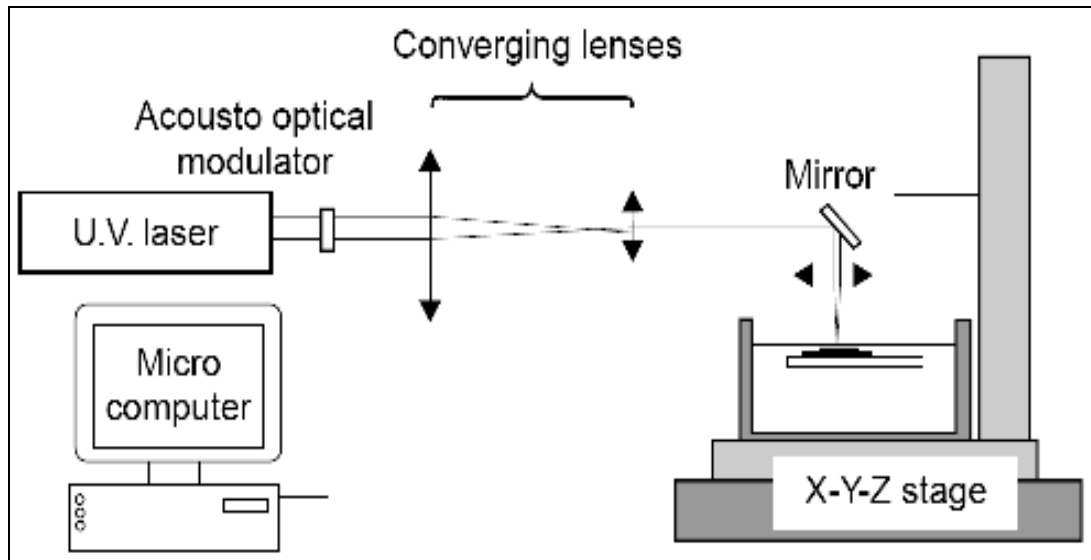


Figura 2.21: Equipamento de μ -SL (Zissi *et al* , 1996)

Este facto obriga à existência de um nivelador para o controlo da espessura de cada camada a polimerizar o que influencia de forma negativa o tempo de construção. Devido a este facto esta técnica desenvolvida por Zissi (1997) e Zhang (1998) utiliza resinas de muito baixa viscosidade. O processo integrante de microestereolitografia (Figura 2.22) corresponde a uma técnica mais recente que utiliza um gerador padrão dinâmico para modelar o feixe de luz proveniente da fonte de radiação segundo a imagem de cada camada a construir (Bertsch *et al*, 1997). Esta imagem é em seguida reduzida e focada sobre a superfície da resina a solidificar através de um sistema óptico apropriado. Este processo, caracteriza-se por elevadas velocidades de construção e ausência de polimerizações indesejadas devido ao facto da densidade do fluxo de luz incidente sobre a superfície da resina ser baixo quando comparado com os processos anteriores. A resolução máxima é da ordem dos 5 μm .

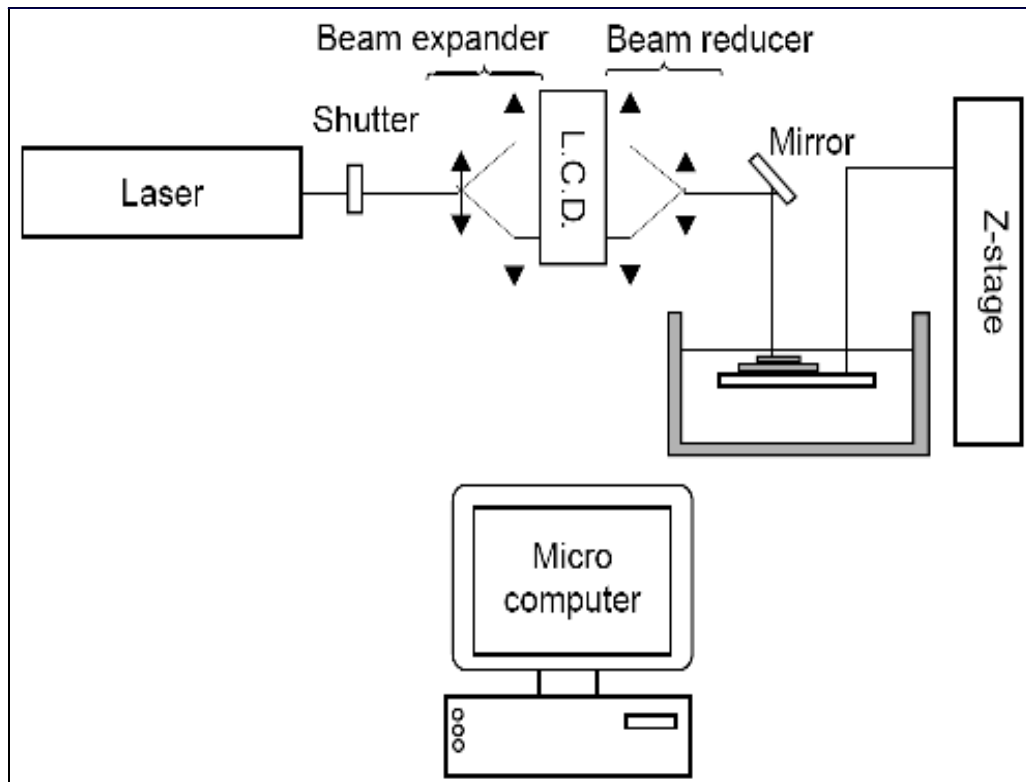


Figura 2.22: Equipamento de μ -SL com gerador de máscaras dinâmico (Bertsch *et al*, 1997)

Desenvolvimentos mais recentes no campo dos equipamentos para micro-estereolitografia foram alcançados devido à possibilidade de utilizar outros sistemas de geração dinâmica de máscaras mais eficientes. É disso exemplo o uso de matrizes de micro-espelhos (DMDTM – *Digital Micromirror Devices*) produzidos e comercializados pela Texas Instruments. Este componente é um dispositivo MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) que funciona como um interruptor de luz, reflectindo na direcção pretendida as zonas transparentes da máscara e desviando cerca de 30 graus as zonas opacas.

A aplicabilidade destes equipamentos começou por ser demonstrada por Beluze *et al* (1999). Foi utilizada uma matriz de micro-espelhos com uma resolução VGA (640 x 480) para produzir um modelo com irradiação no espectro visível.

A velocidade média de construção obtida, dependendo da forma geométrica das camadas, foi de 200 a 300 camadas por hora, e a resolução máxima alcançada foi $3 \times 3 \times 3 \mu\text{m}^3$. Desenvolvimentos posteriores nos DMD™ disponíveis comercialmente permitiram alargar a utilização desta tecnologia a outros comprimentos de onda. É disto exemplo trabalhos de investigação desenvolvido no Laser Zentrum de Hannover (Alemanha) e no Centro para o Desenvolvimento Rápido e Sustentado de Produto (CDRSP) do Instituto Politécnico de Leiria (Figura 2.23).

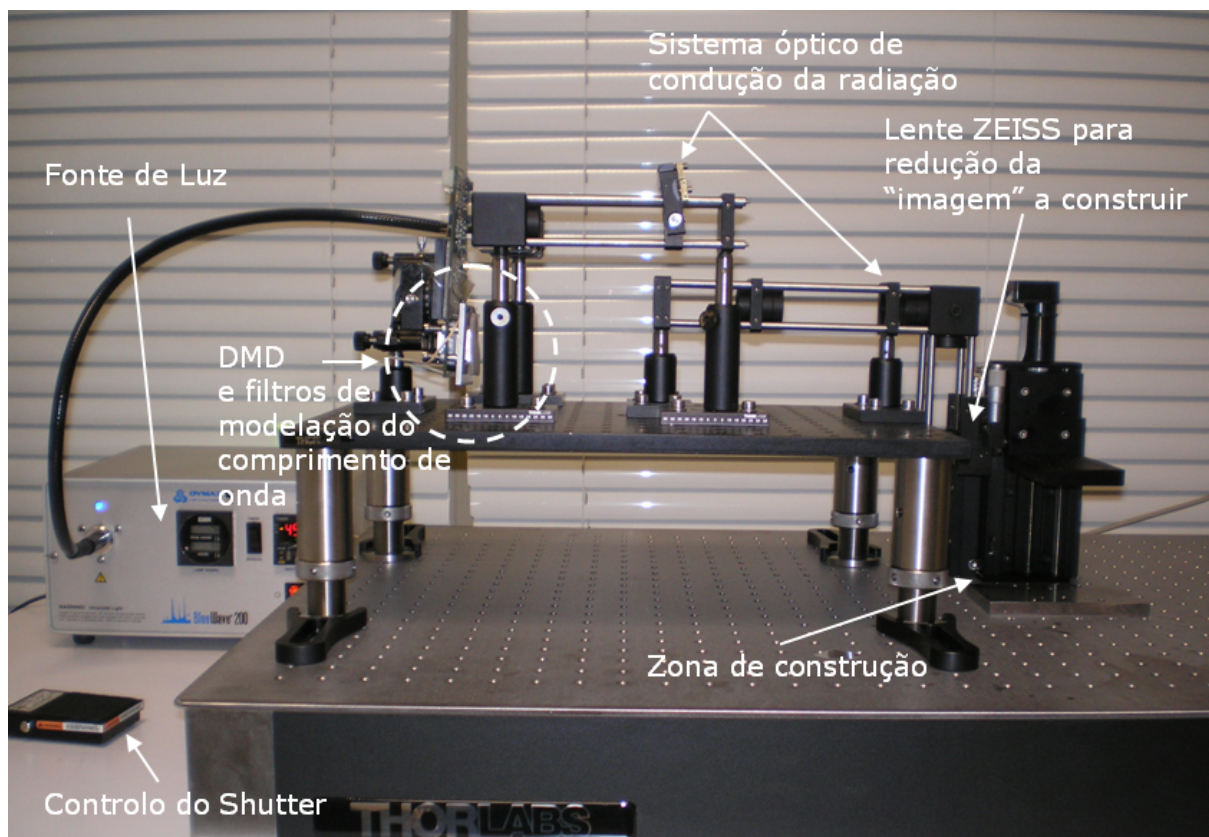


Figura 2.23: Equipamento protótipo de microestereolitografia em desenvolvimento no CDRSP do Instituto Politécnico de Leiria

2.2.1.2 Processos bi-fotónicos

A foto-polimerização bi-fotónica (2PP–*Two Photon Polymerization*) é uma técnica estereolitográfica de microfabrico que consiste na polimerização de um polímero foto-sensível através de um processo de excitação envolvendo a absorção de dois fotões de radiação (excitação sequencial ou simultânea). Este processo envolve a utilização de um laser femtosegundo (fs, 10^{-15} segundos), permitindo uma maior precisão de focalização da radiação no tempo e no espaço (Ostendorf e Chichkov, 2006).

O processo bi-fotónico foi experimentalmente observado pela primeira vez em 1965 (Pao *et al*, 1965) e utilizado em micro/nanofabrico desde 1997 (Maruo *et al*, 1997). Em estereolitografia bi -fotónica, a absorção dos fotões é confinada a um pequeno volume de material na vizinhança do foco de luz, de dimensões inferiores ao cubo do comprimento de onda, conseguindo-se elevadas resoluções. Por outro lado, quando os materiais são irradiados por acção do laser femtosegundo, a energia é depositada de forma mais rápida que a capacidade de transferência de energia dos electrões para o meio, tornando a absorção num processo adiabático (Saeta *et al*, 1991; Glezer *et al*, 1996, 1997). Na Figura 2.24 apresentam-se alguns objectos produzidos por estereolitografia bi-fotónica.

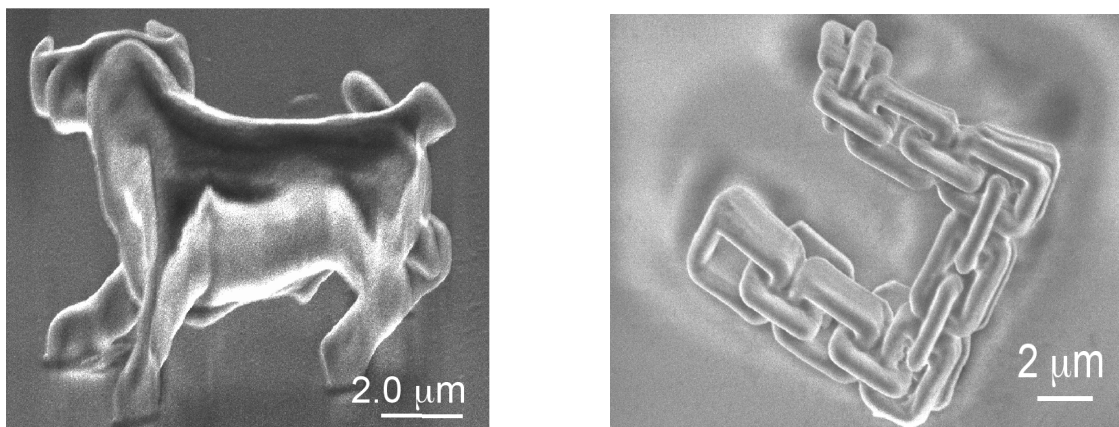


Figura 2.24: Estruturas obtidas por estereolitografia bi-fotónica (Sun e Kawate, 2005)

2.2.2 Microsinterização laser

O processo de sinterização selectiva por laser (SLS – Selective Laser Sintering) é um processo de fabricação aditiva desenvolvido por Deckard (1986) e que se baseia na fusão selectiva de materiais na forma de pó através de uma fonte de calor fornecida por um feixe de laser. Este processo consiste numa plataforma móvel onde são depositadas camadas de pó, num laser emitindo radiação infravermelha e num conjunto de espelhos galvanométricos direccionam o feixe laser sobre a superfície de pó garantindo a sua ligação assim como a adesão entre camadas. O pó não sinterizado serve de suporte às camadas seguintes sendo reaproveitado após o processo de construção.

Actualmente existem dois métodos de construção (Volpato, 2001):

- Processos de sinterização directa
- Processos de sinterização indirecta

A estratégia de sinterização directa, comercializada pela empresa Alemã EOS, utiliza um feixe de elevada potência para sinterizar de forma directa material em pó (polimérico, metálico ou cerâmico) permitindo a obtenção de peças de elevada densidade sem recurso a etapas secundárias. Esta estratégia é habitualmente designada por Fusão Selectiva a Laser (SLM – Selective Laser Melting).

A estratégia de sinterização indirecta, comercializada pela empresa Americana 3D Systems, utiliza lasers de menor potência e pós metálicos e cerâmicos com revestimento polimérico. Neste caso após a obtenção dos modelos deve proceder-se a uma operação de remoção do ligante polimérico e em seguida a uma etapa de infiltração. Os principais parâmetros de processamento em sinterização são a potência do laser, a velocidade de varrimento e o espaçamento entre as passagens (Volpato, 2001). Os lasers utilizados em sinterização são habitualmente lasers gasosos (lasers de CO₂) e lasers de estado sólido (lasers Nd:YAG), variando a potência do laser necessária para a sinterização com o material a processar. A utilização de um ou de outro tipo de laser depende das

características de absorção de radiação uma vez que ambos irradiam em comprimentos de onda diferentes (o laser de Nd:YAG emite radiação com comprimento de onda de 1.06 μm enquanto o laser de CO_2 emite radiação com comprimento de onda de 10.6 μm) – ver igualmente Tabela 2.3). A tecnologia de microsinterização (Figura 2.25), extensão do processo convencional de prototipagem rápida por sinterização, foi desenvolvida no Laser Institute de Mittweida, Alemanha, em 2003 e recentemente cedida para comercialização à empresa 3D MICROMAC.

O processo permite a obtenção de microcomponentes com resolução $<30\mu\text{m}$ e razão de aspecto $>12:1$, utilizando uma câmara inerte ou vácuo e um laser pulsado Nd-YAG irradiando radiação infravermelha com comprimento de onda de 1064 nm. Vários pós metálicos têm sido testados (Tabela 2.3). Na Figura 2.26 apresentam-se alguns componentes obtidos por microsinterização. Os coeficientes de absorção dos materiais mais utilizados em sinterização são indicados na Tabela 2.4.

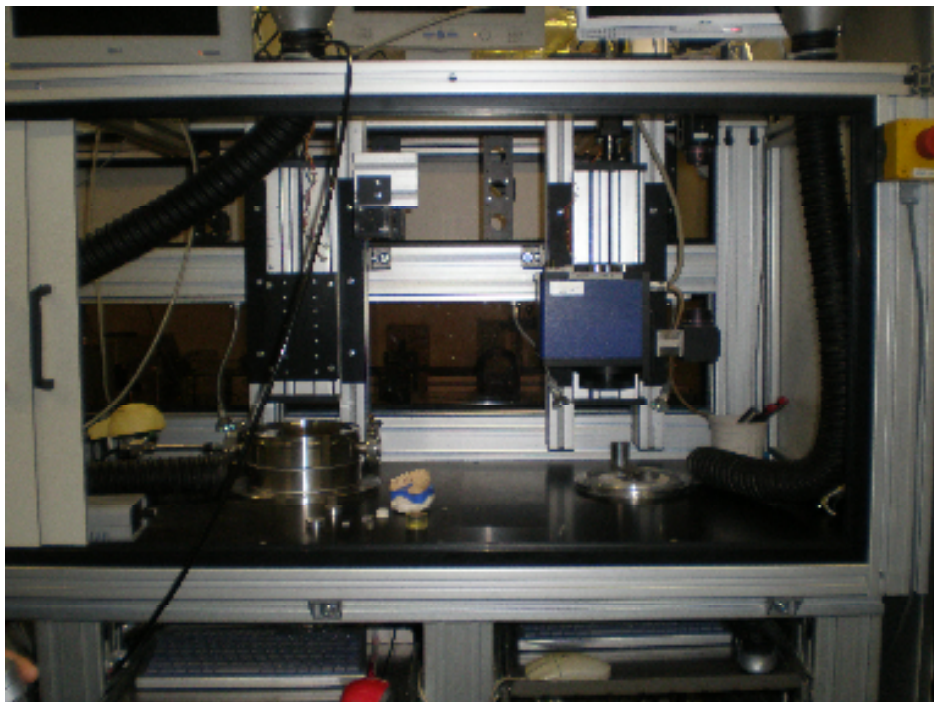


Figura 2.25: Sistema de microsinterização em desenvolvimento no Laser Institute de Mittweida

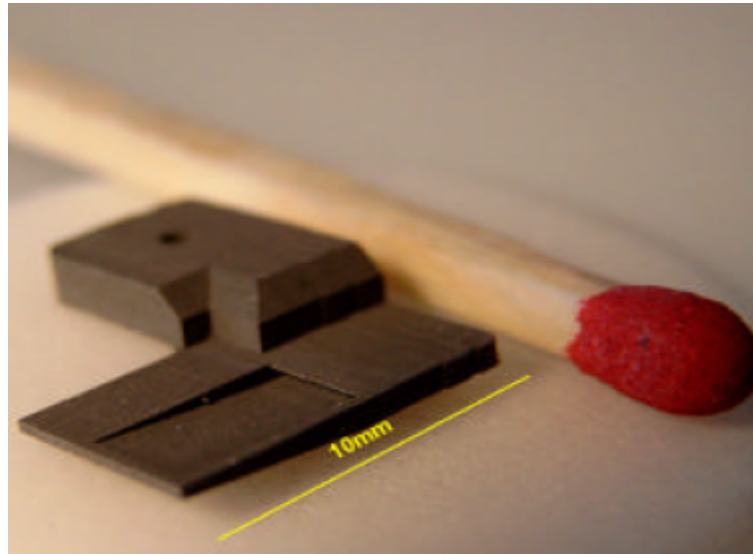


Figura 2.26: Componentes obtidos por microsinterização (Petsch *et al*, 2004)

Tabela 2.3: Pós metálicos testados em μ SLS

Metal	Tungsténio	Alumínio	Cobre	Prata
Tamanho de grão	300 nm	3 μ m	10 μ m	2 μ m

Uma alternativa recente ao processo de microsinterização foi desenvolvida pela empresa Matsuura Machinery (Japão) e consiste numa estratégia híbrida de combinação da microsinterização com maquinagem a alta velocidade. Este sistema, designado por LUMEX utiliza um laser de CO₂ de 500W de potência para sinterizar uma mistura de pós aço/cobre ou ferro/cobre/níquel e um sistema de microfresagem para garantir um bom acabamento superficial e tolerâncias na ordem dos 25 μ m.

Tabela 2.4: Coeficientes de absorção dos materiais mais utilizados em sinterização

	Laser Nd:YAG	Laser CO₂
Material	$\lambda = 1.06 \mu\text{m}$	$\lambda = 10.6 \mu\text{m}$
Cobre	0.59	0.26
Ferro	0.64	0.45
Estanho	0.66	0.23
Titânio	0.77	0.59
Liga de Cobre (1%C;28%Cr;4%W)	0.58	0.25
Liga de Níquel (13%Cr;3%B;4%Si;0.6%C)	0.64	0.42
Liga de Níquel (15%Cr;3.1%Si;0.8%C)	0.72	0.51
Óxido de Zinco	0.02	0.94
Alumina	0.03	0.96
Carboneto de Titânium	0.82	0.46
PTFE (Teflon)	0.05	0.73
Polytetrafluoroethylene		
Resina Epoy	0.09	0.94
Epoxypolyether-based polymer		

2.3 Processos híbridos

Os processos denominados por híbridos compreendem a utilização de técnicas de remoção e adição de material, tipicamente, com o objectivo de obtenção de geometrias complexas ou de conjuntos de componentes já pré-montados. Atendendo ao objectivo de produção de microsistemas e/ou microcomponentes, em seguida, apresenta-se um dos processos mais promissores neste sub-domínio do microfabrico.

2.3.1 Processo UPSAMS

O acrónimo UPSAMS é a sigla em inglês para UltraPrecision Manufacturing of Self Assembled Micro Systems, ou seja, fabrico ultra-preciso para micro sistemas auto-montados. Esta técnica combina processos de micromaquinagem com um processo de deposição de material estrutural e de material que irá ser sacrificado (Sharon *et al*, 2003).

Esta combinação possui as vantagens somadas dos processos fotolitográficos e as dos processos de maquinagem de ultra-precisão, permitindo a obtenção de microsistemas auto-montados de componentes verdadeiramente 3D.

As principais fases do processo são (Vasco, 2007) (Figura 2.27):

- O material que vai servir de apoio e que será posteriormente sacrificado é depositado sobre uma base
- É maquinada nesse material uma das metades da peça, deixando uma cavidade com o negativo de metade da peça que se pretende obter
- É depositado o material estrutural que vai constituir a peça final a obter
- O material estrutural vai ser então maquinado de forma a obter a outra metade da peça final
- O material a sacrificar que serviu de suporte para maquinar o material estrutural vai ser removido, deixando apenas a peça final em material estrutural

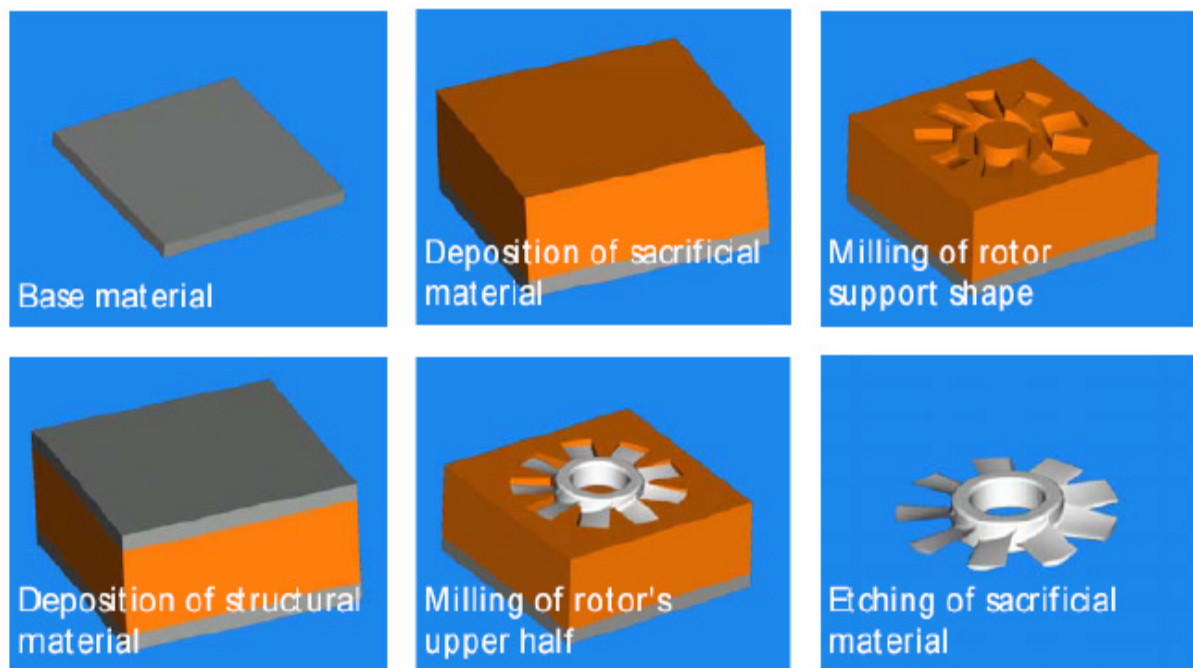


Figura 2.27: Fases do processo UPSAMS (Sharon *et al*, 2003)

O processo UPSAMS permite, relativamente a outros processos, a obtenção de geometrias complexas, a possibilidade de obter microsistemas já montados e apresenta poucas limitações quanto aos materiais que podem ser utilizados. As Figuras 2.28 e 2.29 apresentam um modelo de um microrotor obtido pelo processo UPSAMS.

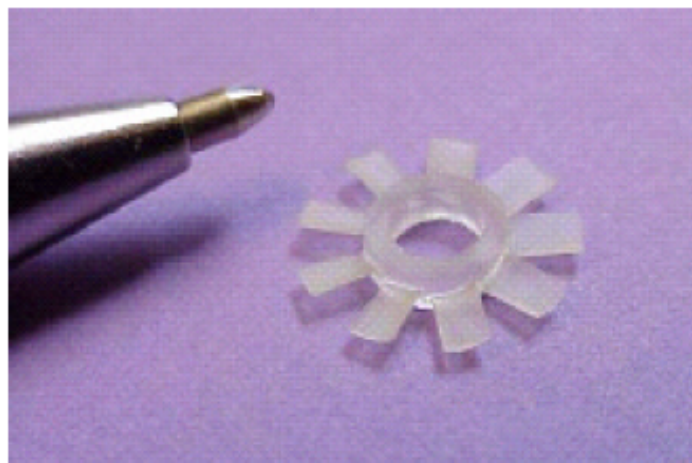


Figura 2.28: Imagem de um rotor obtido pelo processo UPSAMS (Sharon *et al*, 2003)

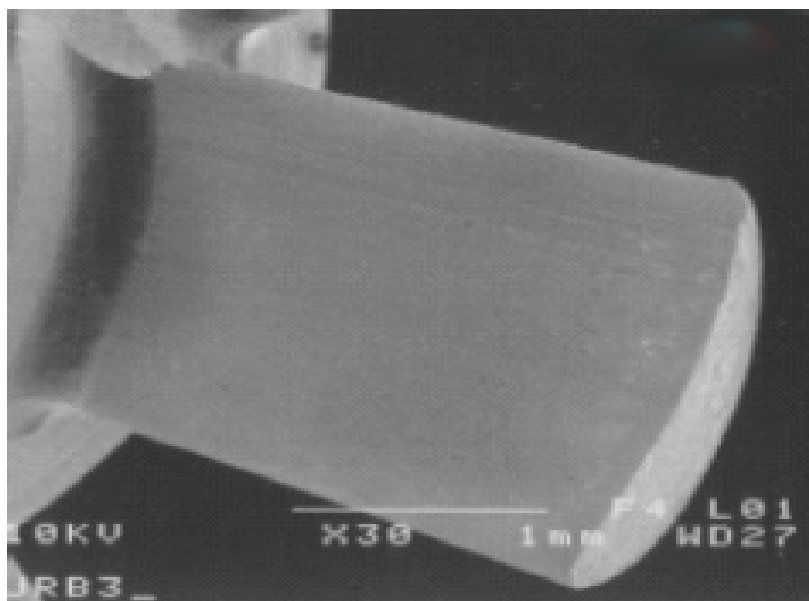


Figura 2.29: Imagem de uma das pás do rotor (Sharon *et al*, 2003)

CAPITULO 3: Microfresagem Laser

A fresagem laser é uma nova tecnologia de maquinagem adequada ao fabrico de uma gama alargada de materiais incluindo metais, vidro, cerâmicos e plásticos.

Neste processo o feixe laser contínuo ou pulsado é focado sob a superfície de um material sólido originando um aquecimento localizado que induz um fenómeno de sublimação ou ablação, sendo particularmente apropriado para a maquinagem de materiais de elevada dureza, difíceis de maquinar convencionalmente.

Um sistema de fresagem laser consiste em:

- uma fonte laser;
- um sistema de posicionamento e fixação da peça;
- um sistema de observação da superfície de trabalho;
- um computador para o controlo do sistema que garante a sincronização entre o feixe laser e o objecto a maquinar;
- um software para o fatiamento (slicing) do modelo CAD 3D.

A informação numérica necessária ao sistema é obtida a partir do modelo fatiado usando-se um algoritmo adequado que, a partir de um modelo CAD em formato STL, o divide em secções transversais de espessura constante.

O movimento relativo entre o feixe laser e o substrato depende de requisitos de precisão e velocidade de processamento. De acordo este movimento relativo existem dois tipos de fresagem laser:

- feixe laser fixo e mesa de trabalho posicionado;
- sistema de varrimento laser e focagem controlada por computador.

Este segundo caso corresponde a um desenvolvimento mais recente e oferece significativas vantagens em termos de velocidade e produtividade.

3.1 Interacção laser-material

A radiação laser possui uma serie de características que a tornam aplicável em fabrico. Para um dado material a ser maquinado, o tipo de laser utilizado determina a interacção laser-material.

A radiação laser pode ser fornecida ao material a maquinar numa sequência de pulsos com duração pré-determinada e uma dada taxa de repetição. Tal permitirá a acumulação de energia em períodos de tempo muito curto que é um pré-requisito para picos de energia. Por outro lado, o feixe de luz pode ser focado sobre o material em pontos de pequena dimensão (10 a 50 μm) o que conduzirá a elevadas densidades de energia e intensidades na zona de incidência. Como consequência, densidades energéticas bastante elevadas (10^{17} e 10^{22} w/m^2) são fornecidas na zona de interacção laser-material. Este facto explica a capacidade dos lasers na maquinagem de materiais tradicionalmente difíceis de maquinar.

A radiação laser é monocromática o que significa que a resposta do substrato e as suas propriedades se mantêm relativamente uniformes e que um processo estável pode ser facilmente obtido. Existem três tipos de laser passíveis de serem utilizados:

- lasers de díodo
- lasers no estado sólido
- lasers gasosos.

Os lasers mais utilizados em fabricação são o laser de CO_2 , laser de excímero, e laser Nd:YAG. Na Tabela 3.1 apresentam-se algumas das principais características dos lasers mais frequentemente utilizados em processos de fabrico.

Tabela 3.1: Principais características dos lasers utilizados em processos de fabrico.

Tipos de laser	Comprimento de onda	Potência	Modo operativo
Laser de diodo	Infravermelho	> 100 W	Pulsado em modo continuo
Laser Nd:YAG (sólido)	1.06 μm	1W-3KW	Pulsado em modo continuo
Laser ruby (sólido)	Vermelho (típico 694 nm)	MW	Modo pulsado
Laser CO ₂ (gás)	1.06 μm	1W-40KW (100 MW em modo pulsado)	Pulsado em modo continuo
Laser Excimer (gás)	193, 248 e 308 nm (e outros)	1KW-100MW	Modo pulsado (10 -100ns)
Laser He-Ne	632,8 nm (mais comum)	1mW-1W	Modo continuo
Laser ion Argon	515 e 458 (diversos)	1mW-150W	Pulsado em modo continuo

Algumas aplicações, como a microfabrico, requerem elevadas potências laser e elevadas intensidades de radiação, pelo que são frequentemente utilizados lasers de excímeros. Estes lasers desenvolvidos em 1975, constituem uma importante classe de lasers pulsados, possuindo um meio activo constituído por gases raros (árgon, cóprton ou xénon e halogéneo).

O tipo de laser utilizado determina o comprimento de onda, a intensidade de radiação, o diâmetro do ponto de focagem (spot laser) e no caso de lasers

pulsados, a duração do pulso. Todos estes parâmetros condicionam a forma como o feixe laser interage com o material a processar.

Existem três tipos de interacção possível entre a radiação laser e o material:

- a radiação é reflectida
- a radiação é transmitida
- a radiação absorvida.

Na realidade, estes três fenómenos ocorrem sempre, embora com graus distintos de importância. Como a radiação reflectida e transmitida representam parcelas de energia perdidas no processo de fabricação, o feixe laser para poder ser utilizado em operações de fresagem deve ser altamente absorvido pelo material a processar.

Um dos parâmetros mais importantes a considerar-se no processo de fresagem laser é o comprimento de radiação da luz utilizada. Materiais diferentes absorvem luz correspondente a zonas distintas do espectro electromagnético pelo que é importante seleccionar-se uma radiação cujos fotões sejam os correspondentes ao espectro de elevada absorção por parte do material a processar.

Ao nível molecular, os fotões de radiação infravermelha emitidos por exemplo por lasers de dióxido de carbono e lasers Nd: YAG, interagem com o material, influenciando a forma como os seus electrões vibram. Deste modo, os fotões de radiação infravermelha quando absorvidos fazem com que os electrões vibrem de forma mais rápida, originando-se localmente um aumento de temperatura, o que induz um fenómeno de fusão e evaporação. Os fotões de radiação violeta, por seu turno, são de mais curto comprimento de onda e de maior valor energético. Assim, em certos materiais, os fotões de radiação ultra violeta originam quebra de ligações electrónicas ocorrendo a remoção do material através de um mecanismo directo de sublimação via formação de plasma. A intensidade do feixe laser

(watt/cm^2) corresponde ao quociente entre o pico de potência (watt) e a área do spot laser (cm^2).

Por seu turno, o pico de potência corresponde ao quociente entre a energia do pulso (J) e a duração do pulso (s). O pico de potência deve ser suficientemente largo para vaporizar o material na zona de radiação. Para cada material, existe pois um valor crítico de intensidade de radiação a baixo do qual não existirá qualquer fenómeno de fusão ou evaporação.

De maneira a aquecer-se suficientemente a superfície do material a processar, de modo a ocorrerem fenómenos de fusão e evaporação é necessário terem-se elevadas densidades energéticas. A duração do pulso laser determina de forma significativa a interacção laser-material. A este nível, existem duas importantes considerações a ter presente:

- a energia do pulso laser;
- o tempo de difusão de calor.

Em regra, para uma determinada quantidade de energia, quanto mais curto for o pulso, maior será o pico de potência fornecido ao objecto irradiado. Uma vez irradiada a superfície do objecto, a energia calorífica decorrente do processo de radiação, não permanece localizada no ponto onde foi inicialmente depositada. Para este fenómeno, é pois importante considerar-se o tempo de difusão calorífica que corresponde ao tempo necessário para que uma determinada quantidade de energia se dissipe. Este tempo é uma característica de cada material. Dependendo deste parâmetro, podemos identificar dois regimes:

- pulsos longos
- pulsos ultra rápidos.

Lasers de pulsos longos são lasers cuja duração do pulso é superior a 10 ps. Estes são actualmente os lasers mais utilizados comercialmente. Lasers ultra

rápidos ou de pulso ultra curto são lasers cujos pulsos tem uma duração inferior a 10 ps, situando-se no domínio do femtosegundo.

No caso de lasers de pulso longo, o calor depositado no substrato difunde-se para as regiões vizinhas na zona de radiação durante a duração do pulso. Tal corresponde a um efeito negativo em termos da qualidade do objecto maquinado e a uma diminuição da eficiência do processo. Como resultado deste fenómeno, a temperatura na zona de radiação atinge um valor não muito superior ao ponto de fusão do material. O material fundido é então ejectado da zona de processamento, sobre a forma de partículas, por acção de vapor e da pressão do plasma. Estas partículas, no caso de retornarem á superfície a maquinar, podem, por um processo de soldadura, danificar a qualidade da superfície maquinada.

Outro efeito negativo da maquinação usando lasers de pulso longo, é a formação de zonas afectadas termicamente. A energia dissipada para as regiões vizinhas na zona a maquinar podem produzir uma região de tensões mecânicas e micro-fracturas. No caso de se utilizarem lasers operando no regime ultra rápido, o pulso laser é tão curto que não existe tempo para a dissipação da energia depositada. Neste caso, toda a energia é usada de forma eficiente para aquecer o material abaixo do seu ponto de evaporação, no estado de formação do plasma. O plasma expande-se para fora da superfície, numa nuvem de electrões e átomos altamente ionizados.

Consequentemente, não existem partículas que solidifiquem e se soltem sobre a superfície, e não havendo tempo para a dissipação de calor para a região vizinha, não existe zona termicamente afectada. É igualmente importante notar que, quando o material é irradiado usando um laser ultra rápido, a profundidade de penetração e o volume de interacção laser-material é menor, reduzindo-se assim o processo de remoção de material.

Como não existem efeitos térmicos secundários, o processo apesar de mais lento é no entanto mais preciso. O mecanismo de interacção laser-material para pulsos no domínio do picosegundos (ps) e femtosegundos (fs) é semelhante (Figura 3.1).

Nestes regimes a interacção corresponde a uma transição directa sólido vapor. Na Figura 3.2 ilustra-se o efeito da interacção laser-material no caso de pulsos de duração no domínio do nanosegundo (ns) ou superior. Neste caso, tal como se disse anteriormente, a energia fornecida pelo pulso laser funde o material aquecendo-o até à temperatura de vaporização.

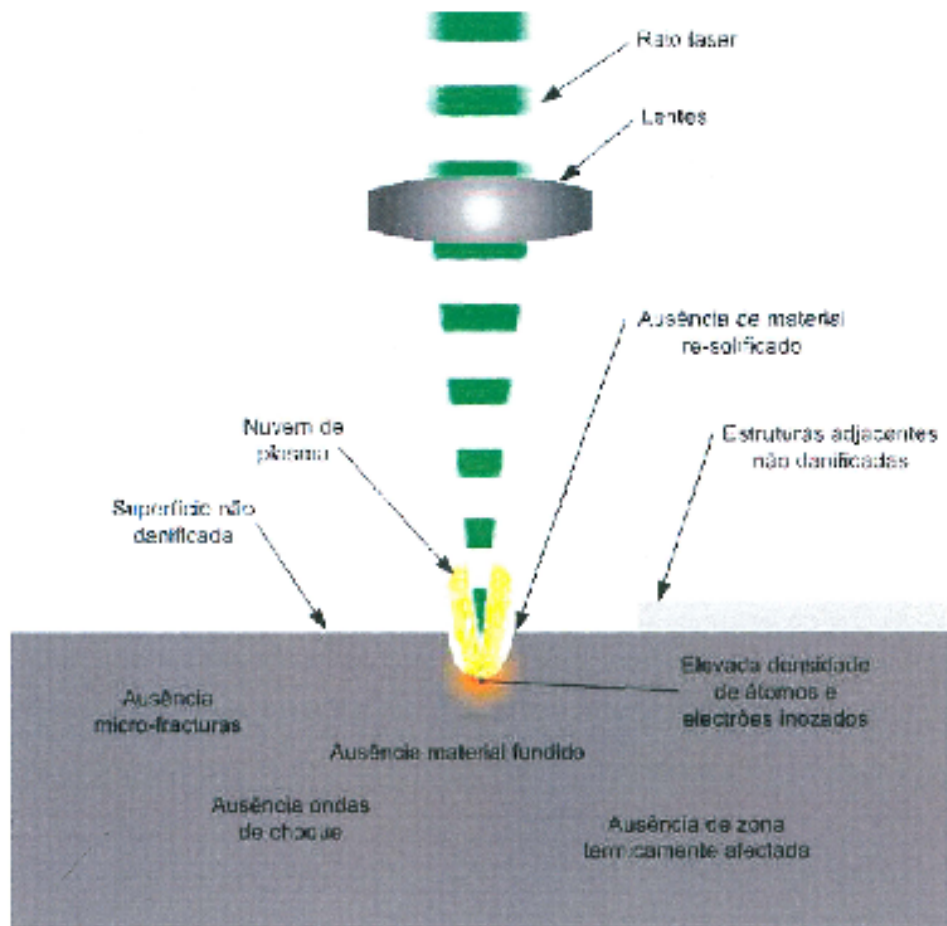


Figura 3.1: Interacção laser-material para pulsos de duração no domínio do femtosegundo e picosegundo

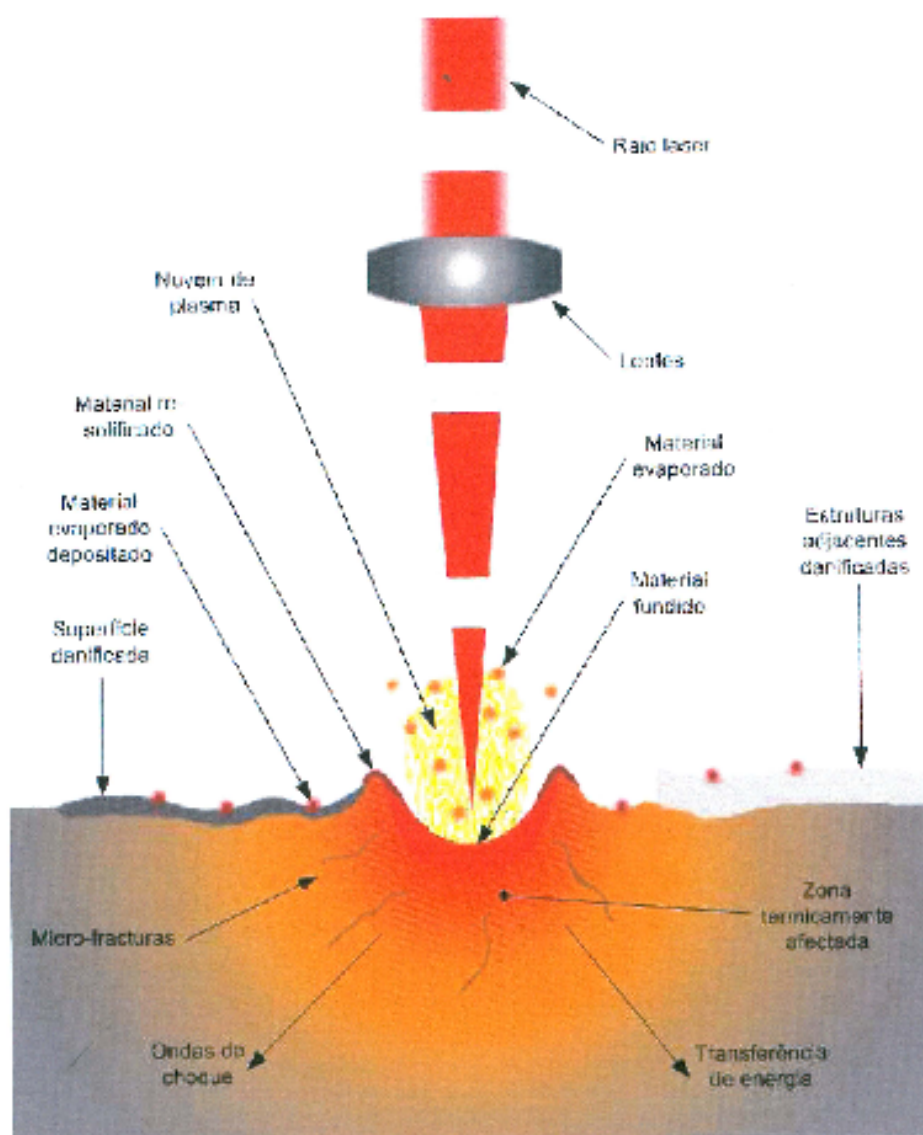


Figura 3.2: Interação laser-material para pulsos de duração no domínio do nanosegundo ou superior

Em fresagem laser, quando o objectivo é produzir características ou detalhes o mais pequenas possível, é importante focar-se o laser em pontos de pequena dimensão. Esta focagem depende de vários factores muito embora, tipicamente, o diâmetro de spot laser mais pequeno que se consegue, seja cerca de metade do comprimento de onda da radiação utilizada. Contudo lasers de pulsos ultra curtos,

têm sido utilizados para produzir detalhes com dimensões bastante inferiores a do spot laser. Pronko, produziu furos com diâmetro de 300 nm utilizando um spot de 3 µm tirando partido do perfil gaussiano da radiação laser. Efectivamente, de acordo com a distribuição gaussiana de intensidades, o feixe laser apresenta máxima intensidade no centro. O feixe pode ser assim ajustado, de modo a que, apenas a região central de intensidades de radiação estejam acima dos valores críticos para um dado material. Neste caso o material será removido apenas numa pequena fracção da região do spot laser.

3.2 Fresagem laser como processo de microfabrico

A fresagem laser apresenta várias vantagens relativamente aos processos de fresagem tradicional e de electroerosão, na maquinagem de microestruturas devido a:

- operar com uma grande gama de materiais;
- ser um processo de não contacto;
- permitir a obtenção de microestruturas tridimensionais;
- operar de forma directa a partir de ficheiros CAD.

Ao nível do microfabrico, a fresagem laser tem sido utilizada para a produção de micromoldes para injeção, micro-moldes para estampagem, produção de microcomponentes metálicos e cerâmicos, etc.

3.3 Vantagens e desvantagens

As principais vantagens da maquinação laser são:

- ***Processo facilmente integrado em máquinas CNC***

A maquinação laser é um processo flexível que, quando combinada com um sistema de posicionamento multi-eixos, pode apoiar uma vasta gama de aplicações com alta precisão.

- ***Processo em contacto***

- Não há nenhuma interacção mecânica entre o raio laser e a peça. Deste modo, não existe nenhum desgaste da ferramenta durante o processo. O que confere elevada precisão dimensional e repetibilidade, eliminando também a necessidade de mudanças da ferramenta.

- ***Método directo de maquinação***

A maquinação laser é um processo de obtenção de geometrias por remoção directa de material. Por conseguinte em fases intermédias do processo os erros são evitados. A influência do operador sobre o processo é também limitada o que garante uma coerência nos resultados obtidos. Além disso, o programa NC exigido pelo processo é gerado a partir de dados directamente importados a partir de modelos tridimensionais CAD, que é uma condição prévia para a alta precisão do processo global de automação.

- ***Transformação de uma grande variedade de materiais.***

Como o processo óptico-térmico não implica nenhuma envolvente mecânica na interacção ferramenta-peça, a maquinação laser é aplicável a qualquer material que absorvam a radiação no comprimento de onda emitido pelo laser. Materiais avançados, opacos à luz visível e infravermelha, tais como a cerâmica, metal duro, titânio e ligas de níquel, podem ser maquinados utilizando lasers, do tipo CO2 e Nd: YAG.

Para os materiais ópticos, que são transparentes para radiações no espectro visível e infravermelho, podem ser utilizados lasers excímero com emissões de radiação UV. Outra estratégia para a maquinação de materiais com pequena

absorção de radiação laser é a redução do pulso para femtosegundo, diminuindo-se desta forma danos na peça.

- ***Maquinações complexas e micro-maquinagem***

O diâmetro do raio laser é bastante pequeno, permitindo reproduzir pequenos raios e detalhes. A evolução da maquinação laser vem aumentar os actuais limites na tecnologia de maquinação.

- ***Insignificantes forças de corte e simples fixação da peça***

Na maquinação por laser são desprezáveis as forças aplicadas à peça, o que significa que não há nenhuma deformação elástica durante o processo. Isto leva a uma redução suplementar de erros de maquinagem e diminuição do custo de equipamentos auxiliares.

As principais desvantagens da maquinagem laser são:

- ***Baixa eficiência energética***

As perdas energéticas associadas ao processo devem-se à fraca eficiência dos lasers actualmente utilizados (com perdas até 80%).

- ***Grande número de parâmetros associados ao processo.***

A maquinagem laser é um processo complexo realizado em centros de maquinação. O número de parâmetros que determinam ou podem determinar o processo de fabrico é significativo e conduzem à necessidade de uma selecção criteriosa de valores e a um planeamento eficaz.

- ***Existência de zonas termicamente afectadas***

Como já foi descrito anteriormente, os principais mecanismos de remoção de material a laser envolve absorção de energia, o que leva a transferência de calor em fases transitórias. Com alguns regimes de pulso, o calor de transferência para

a maior parte do material com condutividade térmica na zona afectada provoca mudança de estrutura no material observado e podem ocorrer fissuras devido a essas solicitações.

- ***Dificuldade de obtenção de paredes verticais.***

Após a maquinação laser, as paredes verticais apresentam um determinado ângulo. Esta é uma grave limitação para aplicações que requerem uma maquinação vertical.

3.4 Sistema de fresagem laser utilizado

Para a realização do trabalho experimental (ver Capítulo 4) utilizou-se um sistema de ablação/sublimação laser DML LASERTEC 40 SI da Deckel Maho disponível na empresa FAMOLDE (Marinha Grande).

Este sistema (Figura 3.3) possui seis graus de liberdade para maquinagem, está equipado com um laser sólido pulsado Nd: YAG de 100 W de potência, possuindo um sensor de medição de profundidades de penetração óptica e um apalpador Heidenhain MT60. Na Tabela 3.2 apresentam-se algumas características importantes deste sistema.

As medições dos vários componentes maquinados foram realizadas numa máquina tridimensional ARES 10.7.5 Mot da Metris (Figura 3.4), que possui um sistema de apalpador RENISHAW com diâmetro de cabeça de contacto de 0.7 mm e cinco graus de liberdade, possuindo uma incerteza de medição de 0.5 μm .

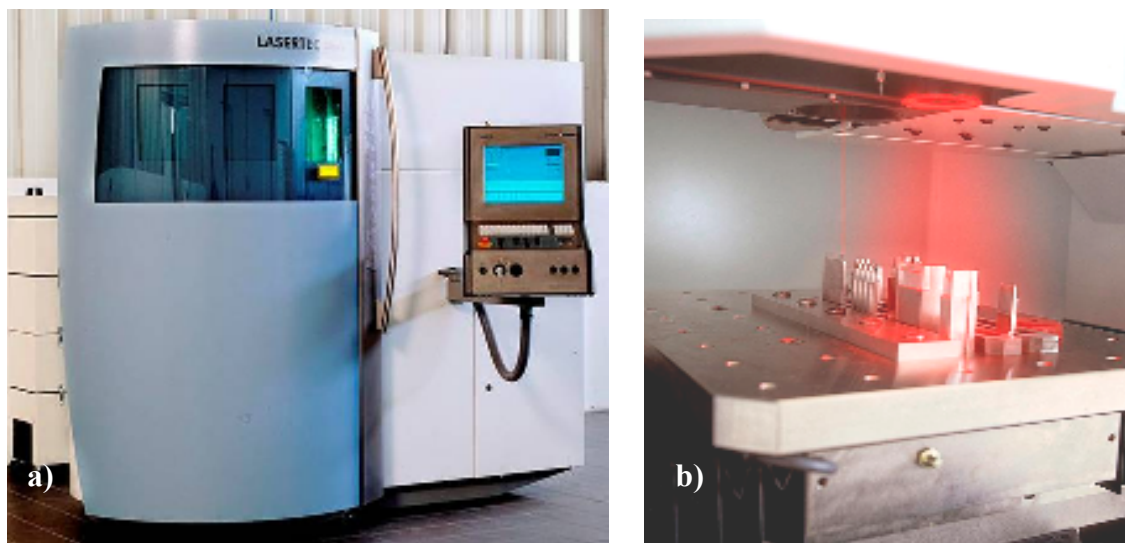


Figura 3.3: a) Sistema de microfresagem laser DML 40 SI; b) Detalhe da zona de maquinagem.

Tabela 3.2: Parâmetros da máquina

Máquina	Valores/Unidades
Voltagem	400/50 (V/Hz)
Mesa de trabalho	
Eixo Z	500 (mm)
Eixos X, Y	400/300 (mm)
Laser	
Tipo	Q-Switch-YAG
Potência máxima	100 (W)
Diâmetro máximo do spot	0.04 (mm)



Figura 3.4: Sistema de medição de coordenadas por contacto ARES 10.7.5 Mot.

Capítulo 4:

Resultados experimentais e sua discussão

De modo a estudar-se o efeito de alguns parâmetros associados à fresagem laser tais como:

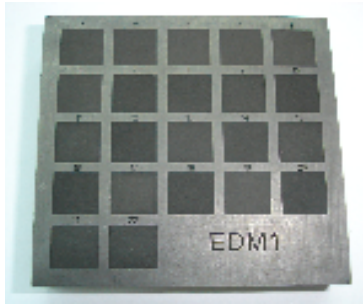
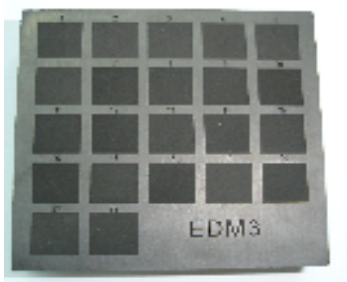

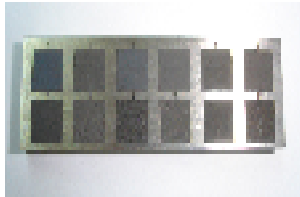
- velocidade de varrimento;
- frequência;
- profundidade de penetração.

consideraram-se três tipos de material com características bastante diferentes.

Deste modo utilizaram-se dois tipos de grafite habitualmente usadas na produção de eléctrodos para a indústria de moldes. Estas duas grafites designadas por EDM1 e EDM3, fornecidas pela empresa Famolde, apresentam características mecânicas e resistividade eléctrica distintas. Foi igualmente utilizado cobre electrolítico fornecido pela empresa Hugo Damásio Lda, material bastante utilizado para aplicações em electroerosão e tal como no caso anterior das grafites, muito utilizado na indústria de moldes. Finalmente, considerou-se o titânio no sentido de se explorar a utilização da microfresagem laser para aplicações no domínio da medicina ou aeronáutica. O titânio utilizado foi fornecido pela empresa Hugo Damásio Lda.

Na Tabela 4.1 apresentam-se as principais características dos materiais utilizados neste estudo

Tabela 4.1: Materiais utilizados

MATERIAL	CARACTERÍSTICAS	COMPONENTE MAQUINADO
Grafite EDM 1	<ul style="list-style-type: none"> - Boa resistência ao desgaste - Bom acabamento - Tamanho médio das partículas $< 5 \mu\text{m}$ - Resistência à flexão 682 kg/cm^2 - Resistência à compressão 998 kg/cm^2 - Dureza (Shore) 69 - Resistividade eléctrica $19.3 \mu\Omega\text{m}$ 	
Grafite EDM 3	<ul style="list-style-type: none"> - Elevada resistência ao desgaste - Fino acabamento superficial - Tamanho médio das partículas $< 5 \mu\text{m}$ - Resistência à flexão 935 kg/cm^2 - Resistência à compressão 1273 kg/cm^2 - Dureza (Sore) 73 - Resistividade eléctrica $15.6 \mu\Omega\text{m}$ 	
Cobre electrolítico	<ul style="list-style-type: none"> - Densidade 8.9 - Resistividade eléctrica (Ωm) 1.72 - Boa condutibilidade eléctrica - Módulo de elasticidade 120000 a 25000 MPa 	
Titânio	<ul style="list-style-type: none"> - Densidade (g/cm^3) 4.51 - Dureza (Vickers) 192 - Condutibilidade eléctrica $2.38 \times 10^6 \Omega\text{m}^{-1}\text{m}^{-1}$ - Condutibilidade térmica $21.9 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ 	

4.1 Resultados

4.1.1 Efeitos dos parâmetros operativos versus taxa de remoção

Verifica-se na Figura 4.1 o efeito da frequência e profundidade de penetração sobre a taxa de remoção para a grafite EDM1 (ver Tabela 4.1). Os resultados mostram que o aumento da profundidade de penetração conduz, tal como o esperado, a um aumento da taxa de remoção verificando-se ao nível da frequência a existência de um valor crítico a partir da qual o aumento de frequência para a mesma profundidade de penetração diminui. Este efeito é particularmente significativo quando se aumenta a velocidade de varrimento tal como se indica na Figura 4.2. Neste caso, é possível verificar-se que para frequências superiores a um valor crítico, a queda da taxa de remoção é tanto mais significativa quanto maior for a profundidade de penetração. Verifica-se igualmente que o valor crítico da frequência depende não só da velocidade de varrimento mas também da profundidade de penetração. Os resultados mostram ainda que para a mesma profundidade de penetração e frequência, quanto maior for a velocidade de varrimento maior será a taxa de remoção de material (ver Figuras 4.1 a 4.4).

No caso de se utilizar uma grafite apresentando maior dureza, maior resistência à compressão e flexão e maior resistividade eléctrica (Grafite EDM3), verifica-se que para a mesma frequência, velocidade de varrimento e profundidade de penetração os valores de taxa de remoção são menores (Figura 4.5). Neste caso, para a faixa de frequência considerada entre 30 e 50 KHz e para as duas velocidades de varrimento utilizadas (750 e 1250 mm/seg), não se observou, ao contrário do caso da grafite EDM1, qualquer valor crítico da frequência.

Os resultados indicados nas Figuras 4.5 e 4.6 mostram um aumento da taxa de remoção com a frequência verificando-se que inicialmente este crescimento é lento sendo, a partir de 40 khz mais significativo principalmente nos casos em que a velocidade de varrimento é maior.

Tais resultados e por comparação com os obtidos para o caso da EDM1, deixam antever ser possível continuar-se a aumentar a frequência para além dos 50KHz sem perdas na taxa de remoção

Na Figura 4.7 e 4.8 apresentam-se gráficos de contorno descrevendo a variação da taxa de remoção em função da frequência e da profundidade de penetração. Os resultados mostram uma variação não linear entre a taxa de remoção e a frequência e para a profundidade de penetração. Estes gráficos podem funcionar como curvas operativas do equipamento para os materiais e velocidade de varrimento consideradas. Tal como seria de esperar, a estratégia de varrimento influencia a taxa de remoção. Efectivamente para a mesma profundidade de penetração, frequência e velocidade de varrimento o aumento do espaçamento entre passagens do feixe laser traduz-se num aumento da taxa de remoção de material tal como se indica nas Figuras 4.9 e 4.10.

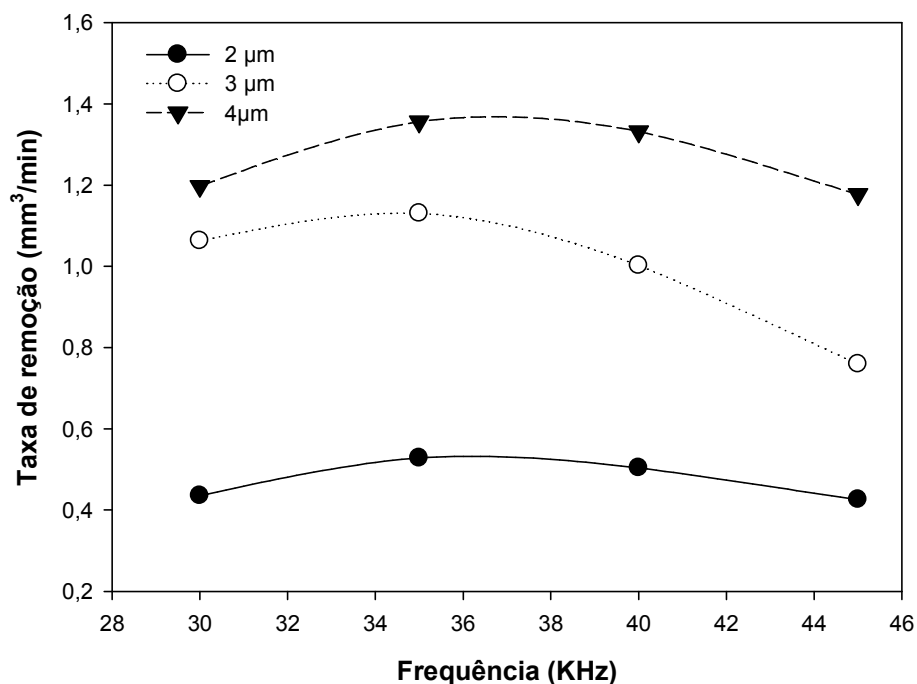


Figura 4.1: Variação da taxa de remoção função da frequência para diferentes profundidades de penetração. Material: EDM1. Velocidade de varrimento: 750 mm/seg

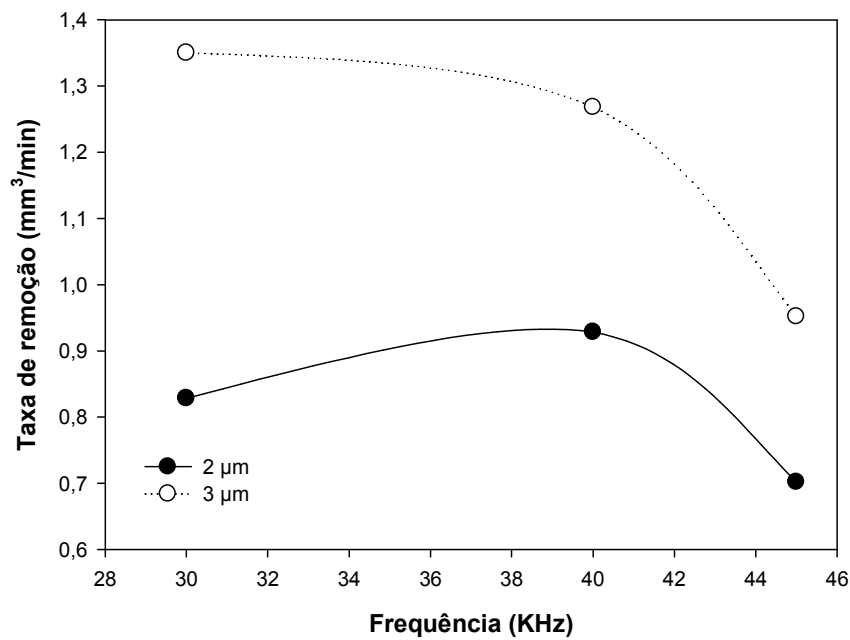


Figura 4.2: Variação da taxa de remoção função da frequência para diferentes profundidades de penetração. Material: EDM1. Velocidade de varrimento: 1250 mm/seg

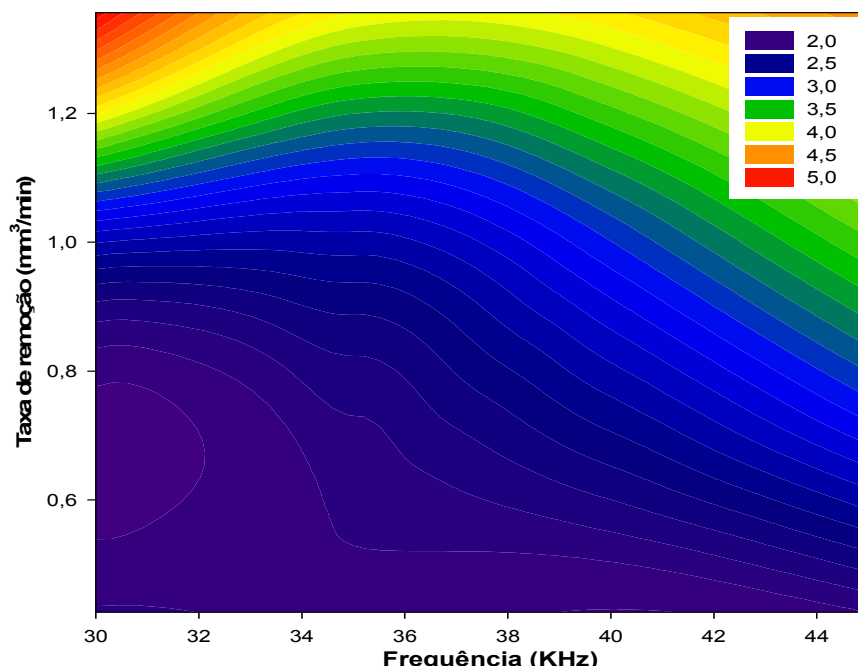


Figura 4.3: Mapa de contorno da variação da taxa de remoção função da frequência e da profundidade de penetração. Material: EDM1. Velocidade de varrimento: 750 mm/seg

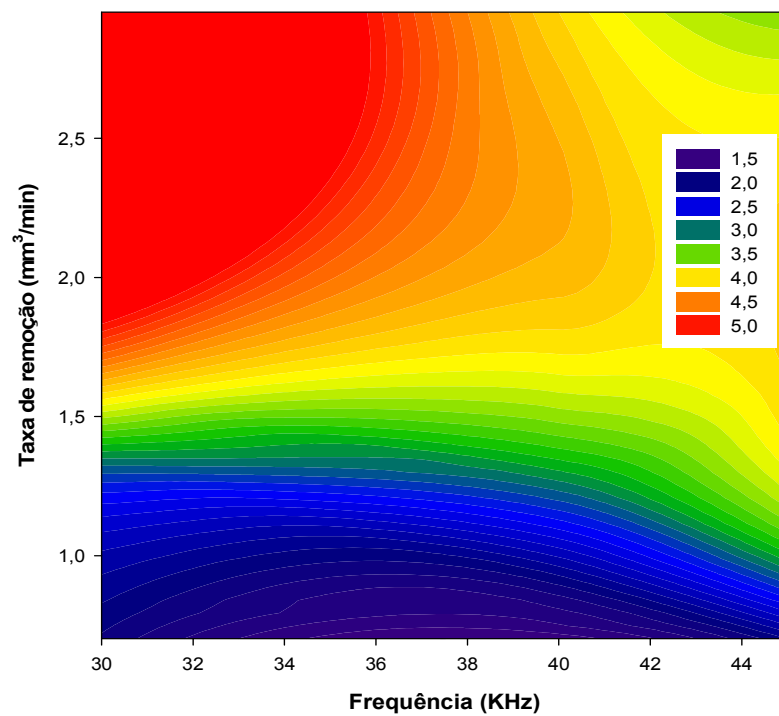


Figura 4.4: Mapa de contorno da variação da taxa de remoção função da frequência e da profundidade de penetração. Material: EDM1. Velocidade de varrimento: 1250 mm/seg

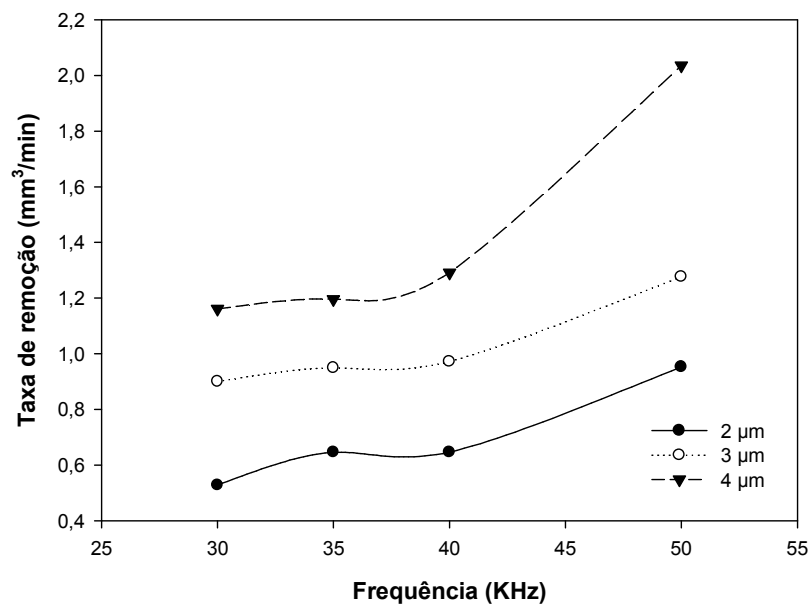


Figura 4.5: Variação da taxa de remoção função da frequência para diferentes profundidades de penetração. Material: EDM3. Velocidade de varrimento: 750 mm/seg

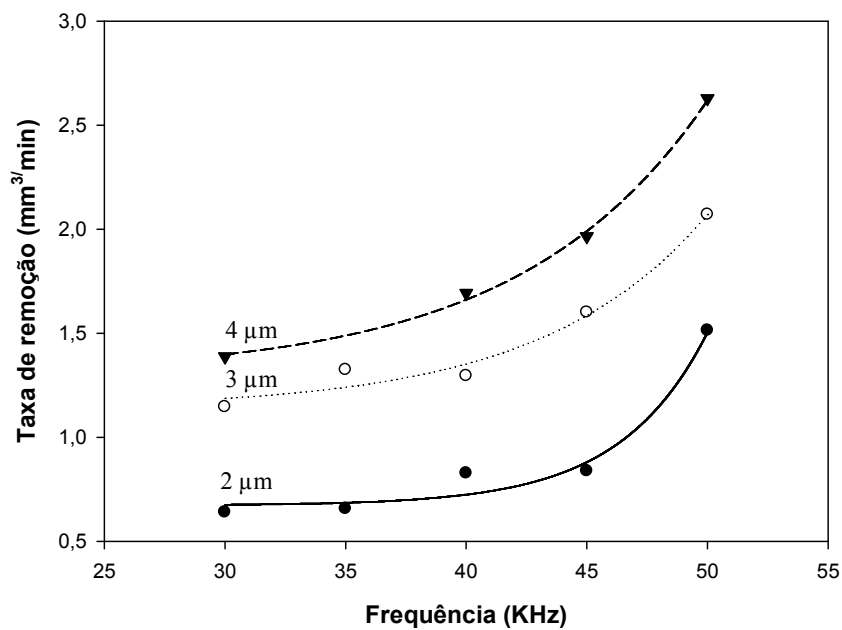


Figura 4.6: Variação da taxa de remoção função da frequência para diferentes profundidades de penetração. Material: EDM3. Velocidade de varrimento: 1250 mm/seg

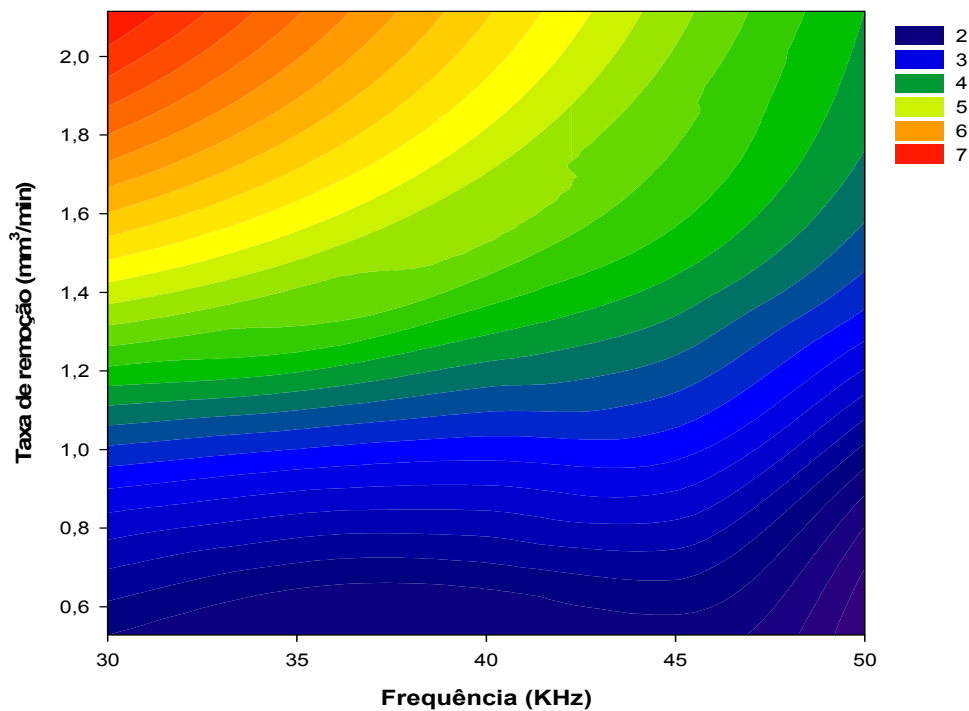


Figura 4.7: Mapa de contorno da variação da taxa de remoção função da frequência e da profundidade de penetração. Material: EDM3. Velocidade de varrimento: 750 mm/seg

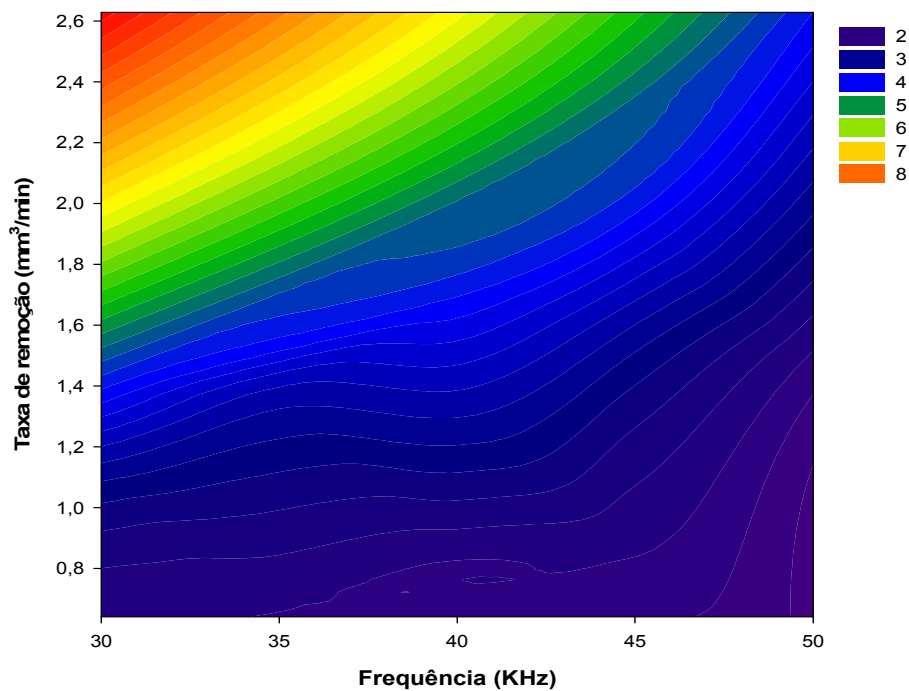


Figura 4.8: Mapa de contorno da variação da taxa de remoção função da frequência e da profundidade de penetração. Material: EDM3. Velocidade de varrimento: 1250 mm/seg

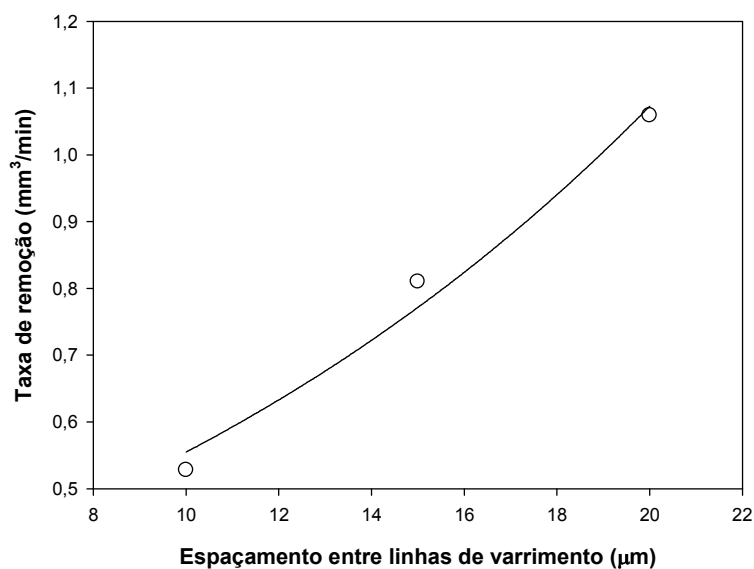


Figura 4.9: Efeito do espaçamento entre passagens do feixe laser (*hatch*) sobre a taxa de remoção. Material: EDM3. Velocidade de varrimento: 750 mm/seg, Profundidade de penetração 2 μm e frequência de 30 kHz

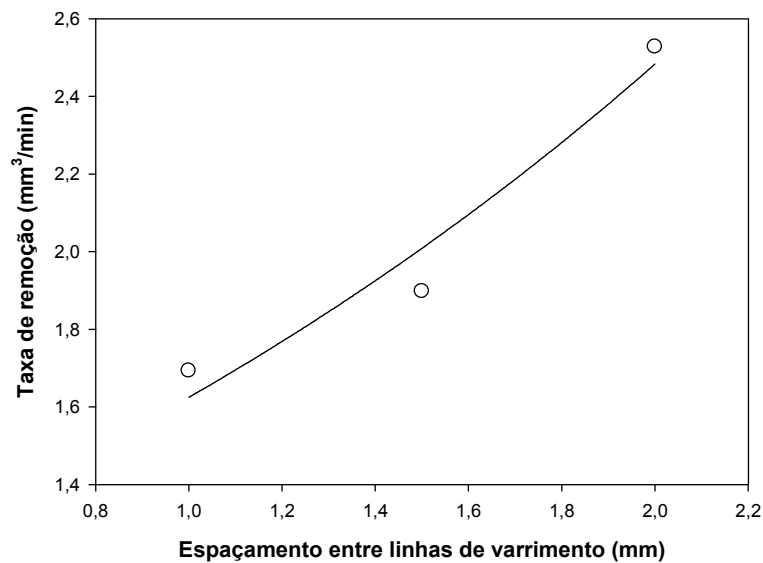


Figura 4.10: Efeito do espaçamento entre passagens do feixe laser (*hatch*) sobre a taxa de remoção. Material: EDM3. Velocidade de varrimento: 1250 mm/seg, Profundidade de penetração 4 μ m e frequência de 40 KHz

Na Figura 4.11 indica-se o efeito da frequência e profundidade de penetração sobre a taxa de remoção para o titânio. Os resultados mostram que, para um valor de frequência mais baixo e uma maior profundidade de penetração, a taxa de remoção de material é superior. Para frequências do feixe laser na ordem dos 45 KHz, verifica-se uma maior taxa de remoção de material para uma maior profundidade de penetração. Estes resultados verificam-se para uma velocidade de varrimento de 300 mm/seg. A figura 4.12 mostra que, para o mesmo material, titânio, alterando a velocidade de varrimento de 300 mm/seg para 500mm/seg e uma profundidade de penetração de 4 μ m, o valor da taxa de remoção do material é superior para baixas frequências, na ordem dos 30 KHz, e inferior para frequências na ordem dos 45 kHz. Comparando os gráficos das figuras 4.11 e 4.12 conclui-se que, para este material, se obtém maior taxa de remoção para uma frequência na ordem dos 35 kHz considerando uma profundidade de penetração de 4 μ m e uma velocidade de varrimento de 500 mm/seg.

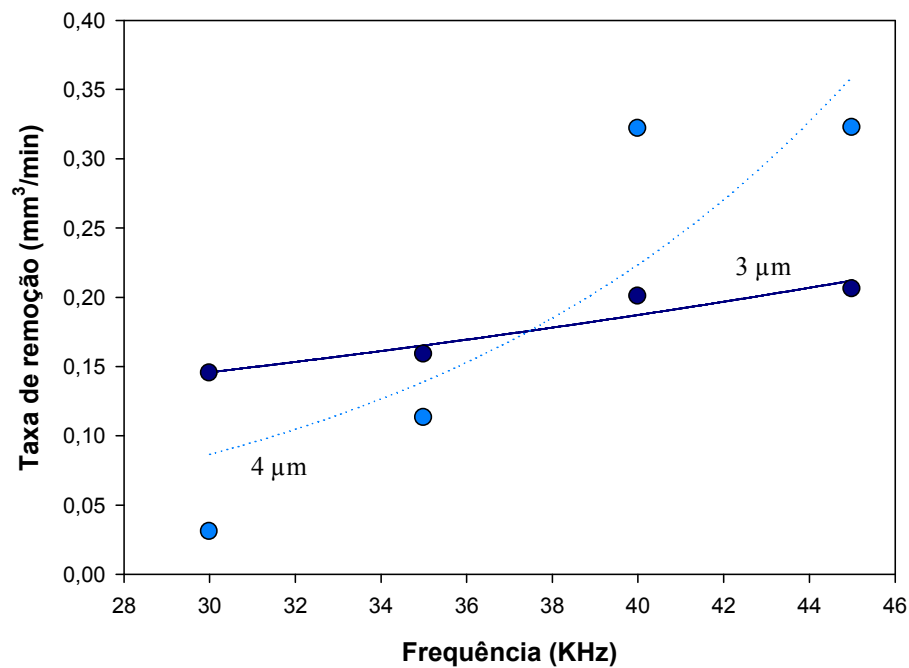


Figura 4.11: Variação da taxa de remoção com a frequência para diferentes profundidades de penetração. Material: titânio. Velocidade: 300 mm/seg

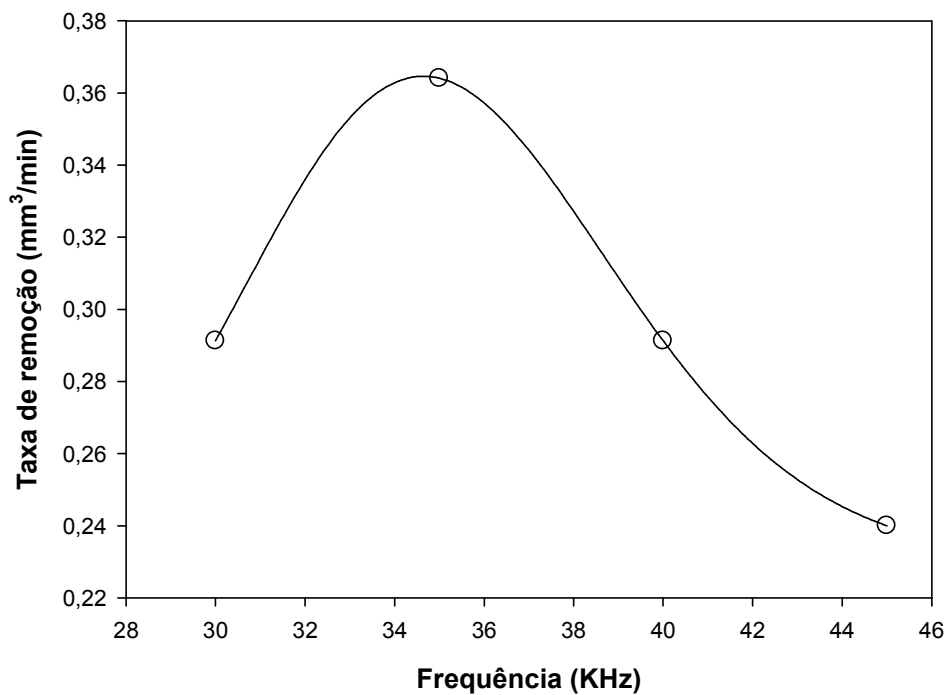


Figura 4.12: Variação da taxa de remoção com a frequência. Material: titânio. Velocidade: 500 mm/seg. Profundidade de penetração: 4 μm

Nas Figuras 4.13 e 4.14, mostra-se a taxa de remoção de material obtida para o cobre, considerando duas frequências de valores distintos (15 e 25 KHz), velocidades de varrimento entre 200 e 600 mm/seg e profundidades de penetração de 2, 3 e 4 μm . Verifica-se um crescente aumento do valor da taxa de remoção de material com o aumento do valor da frequência. Ao aumento da taxa de remoção de material corresponde uma maior profundidade de penetração para as duas frequências utilizadas. Também, quanto maior for o valor da velocidade de varrimento implementada, maior é o valor da taxa de material removido. Para profundidades de 3 μm e 4 μm e frequência de 25 KHz, a taxa de remoção de material é crescente e superior às obtidas para as mesmas profundidades de penetração e frequência de 15KHz.

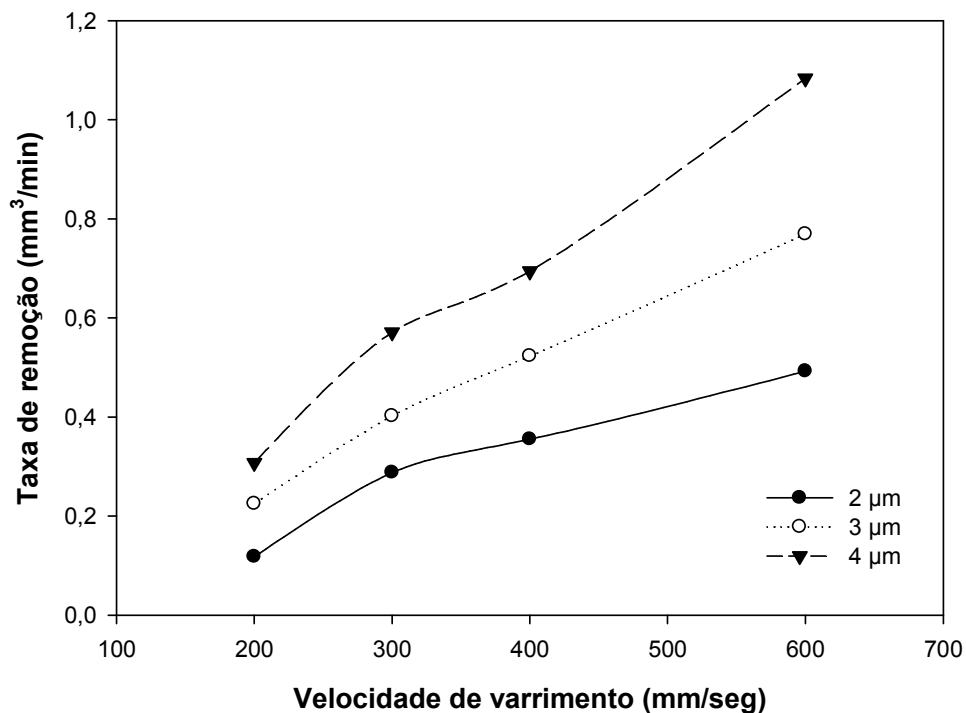


Figura 4.13: Variação da taxa de remoção com a velocidade de varrimento para diferentes profundidades de penetração. Material: cobre. Frequência: 15 KHz

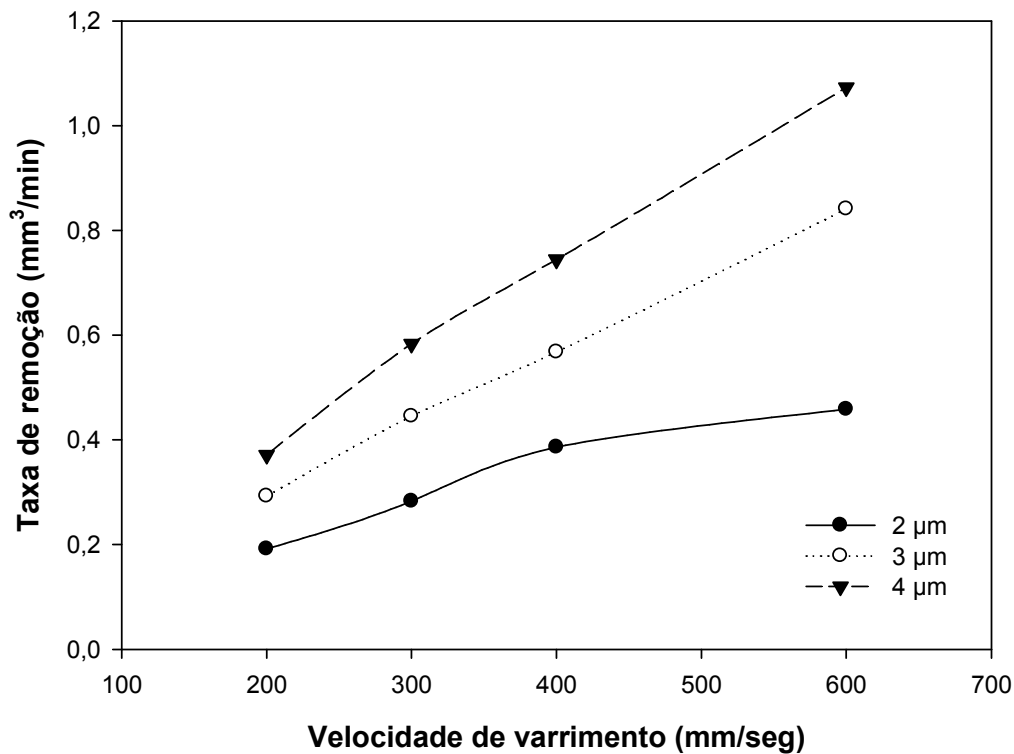


Figura 4.14: Variação da taxa de remoção com a velocidade de varrimento para diferentes profundidades de penetração. Material: cobre. Frequência: 25 KHz

4.1.2 Efeitos dos parâmetros operativos versus rugosidade

4.1.2.1 Definições

As superfícies dos componentes mecânicos devem ser adequadas ao tipo de função que exercem. A rugosidade (erros micro geométricos) é o conjunto de irregularidades, isto é, pequenas saliências (picos) e reentrâncias (vales) que caracterizam uma superfície (Figura 4.15). Estas irregularidades desempenham um papel importante no comportamento dos componentes mecânicos, influenciando nomeadamente na:

- qualidade de deslizamento;

- resistência ao desgaste;
- resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes;
- qualidade de aderência que a estrutura oferece às camadas protectoras;
- resistência à corrosão e à fadiga;
- aparência, etc..

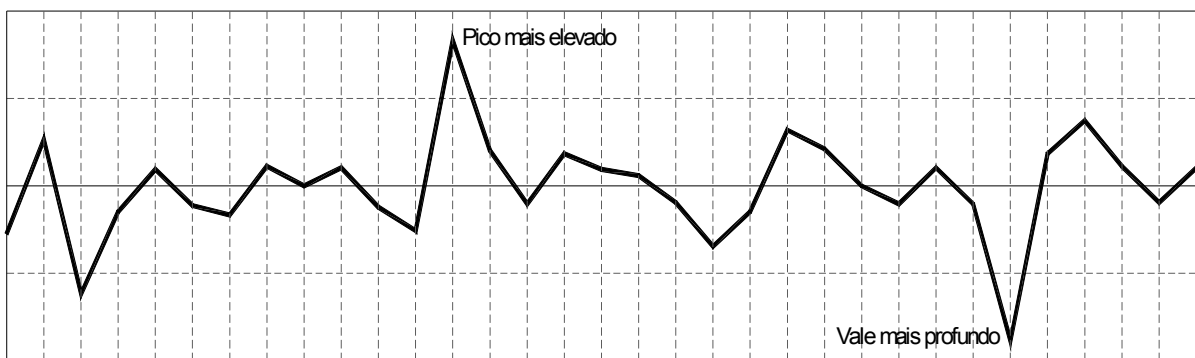


Figura 4.15: Picos e vales num troço de um perfil de rugosidade

A rugosidade é assim o indicador do estado de uma superfície e depende do processo tecnológico e dos parâmetros utilizados para a sua obtenção. A rugosidade está também associada à funcionalidade atribuída à superfície a que se refere, ou seja, um acabamento superficial excelente pode nem sempre ser desejável se o objectivo for minimizar o atrito por contacto e a sua obtenção pode implicar a utilização de processos tecnológicos morosos ou mesmo muito mais sofisticados e inerentemente mais dispendiosos. Na Figura 4.16 apresenta-se um perfil de rugosidade.

O controlo da rugosidade será necessariamente diferente em função das superfícies onde é medida, dependendo da sua funcionalidade, pelo que as superfícies se podem considerar como:

- **Não-funcionais:** a rugosidade destas não é problemática dado que a sua aparência não é importante, podendo até atender a factores de ordem estética;
- **Funcionais:** a rugosidade destas obedece a critérios cuja natureza é regulada por questões de funcionamento do componente a que pertence a superfície e pelas superfícies de outros componentes que interajam com esta.

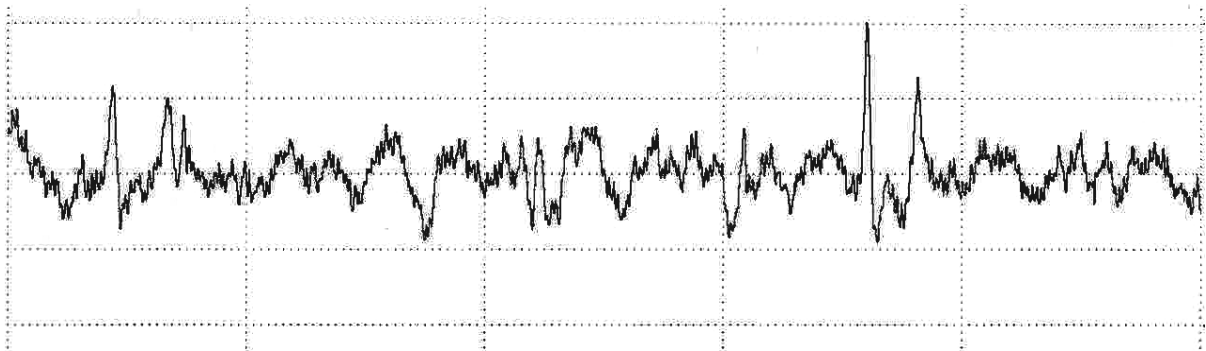


Figura 4.16: Exemplo de perfil de rugosidade

Cada processo, independentemente dos parâmetros tecnológicos e das estratégias de processamento, vai produzir na superfície processada um padrão característico. No caso da fresagem laser, ao contrário dos processos de corte por arranque de apara, não se utiliza uma ferramenta física, podendo-se considerar como periódico e originando uma superfície anisotrópica.

Os principais parâmetros de rugosidade são:

- Rugosidade média aritmética, R_a
- Altura máxima entre picos e vales, R_{max}
- Média das alturas máximas entre picos e vales, R_z
- Rugosidade “estatística”, R_k

A rugosidade média, R_a , é o mais antigo dos parâmetros de rugosidade conhecidos e corresponde à distância média do perfil medido à linha média, correspondente à superfície nominal, de acordo com a seguinte equação:

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |y(x)| dx \quad (4.1)$$

A rugosidade média é utilizada para avaliar condições de desgaste de ferramentas durante o processo produtivo. Por ser insensível ao facto de esses desvios poderem ocorrer quer para cima ou para baixo da linha média, pode ser enganoso quanto ao estado real de uma superfície.

Para a determinação de R_{max} , o perfil de rugosidade obtido para o comprimento de ensaio (L_t), é dividido em 5 troços de comprimento igual (L_c), para o qual é determinada a altura existente entre o pico mais elevado e o vale mais profundo, z_i , ambos relativamente à linha média dentro desse troço. R_{max} é o maior dos valores obtidos para cada um dos 5 troços L_c .

A média das alturas máximas entre picos e vales (Figura 4.16) corresponde ao parâmetro R_z . Este parâmetro é definido de forma distinta pelas normas DIN 4768 e ISO 4287.

R_{max} e $R_{z(DIN)}$ estão fortemente ligados uma vez que $R_{z(DIN)}$ resulta da média aritmética dos 5 valores de z_i obtidos para o cálculo de R_{max} . Pelo facto de estarem em causa os valores máximos entre picos e vales em detrimento de valores médios, o parâmetro $R_{z(DIN)}$ denota uma maior sensibilidade a alterações na superfície avaliada. De acordo com a norma DIN 4768, $R_{z(DIN)}$ é dado por meio da seguinte equação:

$$R_{z(DIN)} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 z_i \quad (4.2)$$

Segundo a norma ISO 4287, $R_{z(ISO)}$ é calculado através da média das distâncias máximas entre os 5 picos mais elevados e os 5 vales mais profundos em todo o comprimento de ensaio (L_t).

Ao contrário do que acontece com $R_{z(DIN)}$, em que cada z_i é calculado dentro de cada troço L_c , para o cálculo de $R_{z(ISO)}$, os picos e os vales podem estar localizados em qualquer posição dentro de L_t . Deste modo $R_{z(ISO)}$, é dado por meio da seguinte equação:

$$R_{z(ISO)} = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 z_{(pico)_i} + \sum_{i=1}^5 z_{(vale)_i} \right) \quad (4.3)$$

A grande diferença entre os dois valores de R_z reside no facto de para $R_{z(ISO)}$, os valores poderem ser medidos entre um pico e um vale localizados em troços L_c distintos enquanto que para $R_{z(DIN)}$, estes valores são obtidos dentro do mesmo L_c . Tal diferença pode tornar-se uma vantagem na medição de rugosidade em comprimentos de ensaio curtos onde $R_{z(DIN)}$ não pode ser avaliado correctamente se não existir um pico ou um vale significativo em cada L_c . Contudo, se existirem vários picos e vales com significado muito próximos, o valor de $R_{z(ISO)}$ pode ser enganoso, uma vez que apenas contabiliza os troços L_c onde o perfil é mais acidentado, enquanto que $R_{z(DIN)}$ contabiliza os acidentes no perfil de rugosidade ao longo de todo o comprimento de ensaio L_t . Quando utilizados em conjunto estes parâmetros são um bom indicador do estado superficial de um dado componente mecânico.

O parâmetro R_k é calculado a partir da curva de relação de material ou curva de Abbott-Firestone, segundo a norma DIN 4776. Esta curva é expressa como uma curva contínua que reflecte a quantidade de picos e vales existentes no perfil de rugosidade obtido.

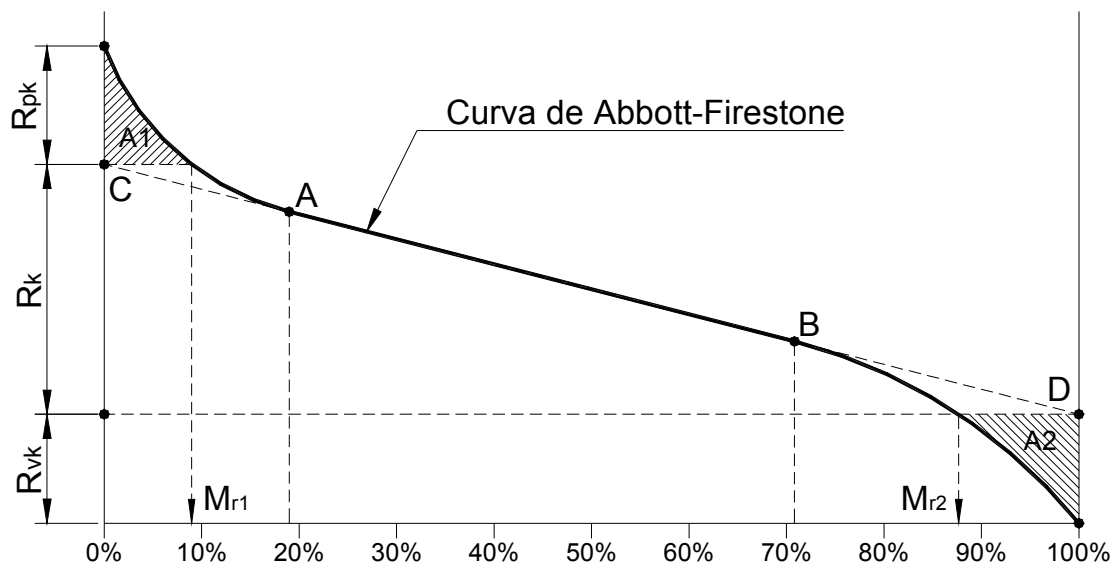


Figura 4.17: Abbott-Firestone e parâmetros de rugosidade

A medição deste parâmetro é realizada pela divisão da curva de Abbott-Firestone em três secções distintas, contendo:

- Os picos mais elevados (R_{pk})
- Os patamares e os picos e vales menos acentuados (R_k)
- Os vales mais profundos (R_{vk}).

A obtenção do parâmetro R_k baseia-se na determinação da zona da curva de relação de material com menor declive num intervalo de 40%.

Uma vez encontrado esse troço da curva com menor declive, entre os pontos A e B, é traçada uma recta colinear com esse troço que intersecta os valores a 0% e a 100%, obtendo-se os pontos C e D e os seguintes parâmetros (Figura 4.17):

- R_k – altura entre os dois pontos de intercepção determinados, C e D.
- R_{pk} – estimativa da altura média dos picos acima de C.

- R_{vk} – estimativa da profundidade média dos vales abaixo de D.
- M_{r1} – fracção da superfície constituída por picos elevados.
- M_{r2} – fracção da superfície constituída por vales profundos.
- A_1 – área correspondente à fracção de picos existentes no perfil de rugosidade.
- A_2 – área correspondente à fracção de vales existentes no perfil de rugosidade, também denominada genericamente como o volume de retenção de lubrificante da superfície

4.1.2.2 Equipamento utilizado para medição da rugosidade

As medições de rugosidade foram realizadas com um rugosímetro Mahr, modelo Marsurf M2 (Figura 4.18).



Figura 4.18: Rugosímetro Mahr modelo Marsurf M2

4.1.2.3 Resultados

Na Figura 4.19 indicam-se as micrografias da superfície rectificada dos blocos de grafite, cobre e titânio, sendo possível observar-se, para o cobre e titânio, a existência de estrias no sentido do deslocamento das mós de rectificação. No caso da grafite observa-se uma maior irregularidade superficial sendo esta maior no caso da grafite EDM3 de maior dureza. Por análise efectuada através de microscopia electrónica de varrimento foi igualmente possível a obtenção de indicações quanto à composição química dos diferentes blocos considerados. Na Figura 4.20 apresentam-se os resultados obtidos para a superfície rectificada de titânio indicada na Figura 4.19. Neste caso, os resultados mostram que o bloco é constituído essencialmente por titânio e vanádio existindo ainda em menor quantidade alumínio. A presença de cálcio poderá dever-se ao manuseamento do bloco.

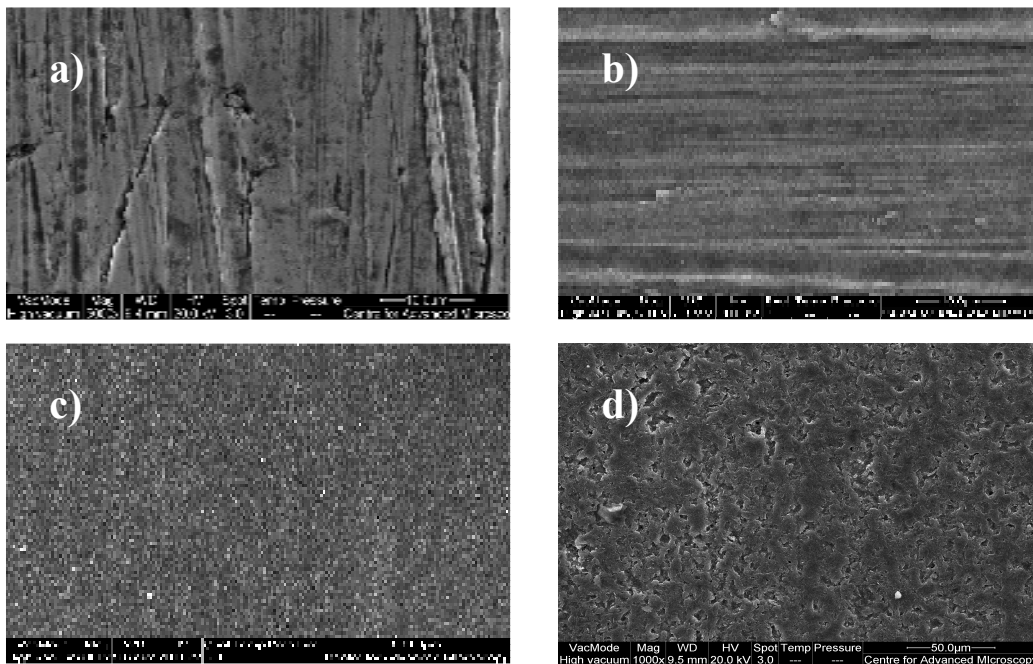


Figura 4.19: a) Micrografia da superfície do bloco de cobre; b) Micrografia da superfície do bloco de titânio; c) EDM1; d) EDM3

Consequência das características associadas ao processo de fresagem laser é criada na superfície maquinada alguma rugosidade cujo perfil pode ser modelado através da definição de linhas de maquinação tal como se indica nas Figura 4.23 e 4.24.

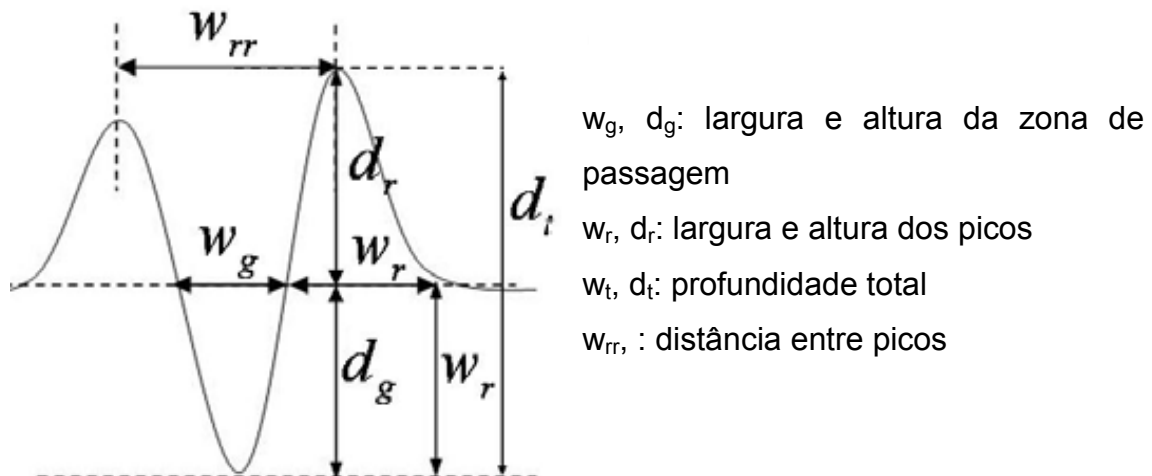


Figura 4.20: Generalização da secção transversal correspondente às linhas de marcação laser (Kruth e Yasa, 2008)

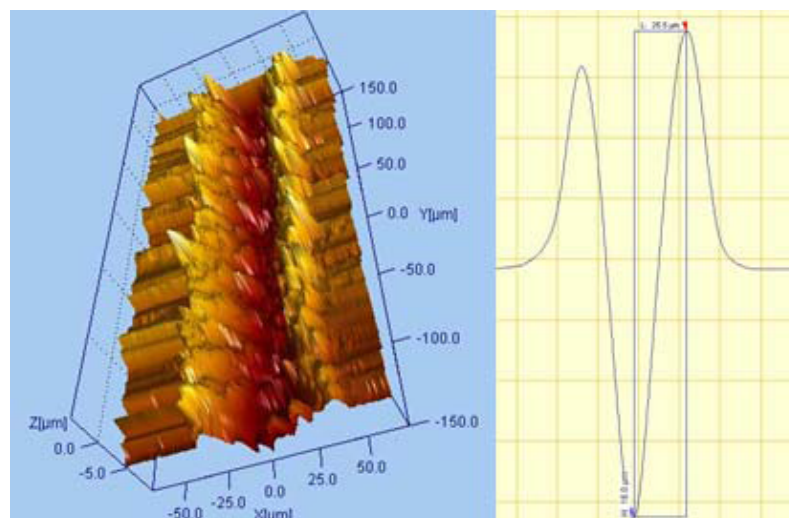


Figura 4.21: a) Perfil de rugosidade; b) Representação bidimensional do perfil da secção transversal correspondente às linhas de marcação laser (Kruth e Yasa, 2008)

De maneira a obter-se uma superfície com um bom acabamento devem-se utilizar parâmetros que minimizem a altura e a largura dos picos, isto é, d_r e W_r .

As irregularidades criadas durante o processo de fabrico devem-se essencialmente ao tempo de duração do pulso. Tal como foi já referido no Capítulo 3, quando o laser interage com o objecto, o primeiro efeito é o do aquecimento da respectiva estrutura sólida. Uma vez atingida a temperatura de fusão do material, a superfície do material funde e se a intensidade do laser for suficientemente elevada, a rápida evaporação que se verifica na zona de fusão do material origina elevadas pressões. Para lasers de pulsos de maior duração existe tempo suficiente para que a onda térmica se propague no material e crie uma relativamente grande camada de material fundido. Neste caso, o material no estado quase-líquido começa a evaporar o que faz com que a definição precisa de estruturas seja dificultada. A irregularidade superficial é assim um resultado das pressões geradas, da grande quantidade de material fundido e de fenómenos de resolidificação.

Quando o material é irradiado com pulsos de curta duração, a profundidade de penetração e consequentemente o volume de interacção com o material é menor, reduzindo-se em consequência o processo de remoção do material. Na Figura 4.25 apresenta-se um furo produzido por acção laser com pulsos de grande duração (4 ns) sendo visível a coroa de irregularidade produzida à superfície. Como os efeitos térmicos secundários são menores quando se utilizam lasers de pulsos de menor duração, as maquinações apresentam melhor qualidade à custa, naturalmente, de um maior tempo de processamento. No presente estudo a utilização de lasers de pulso ultra rápido permite uma transferência de energia para a peça muito elevada fazendo com que a maioria do material sob a acção do laser seja directamente vaporizada sem transferência de calor para as regiões vizinhas permitindo a obtenção de componentes de elevado grau de detalhe tal como se indica na Figura 4.26.

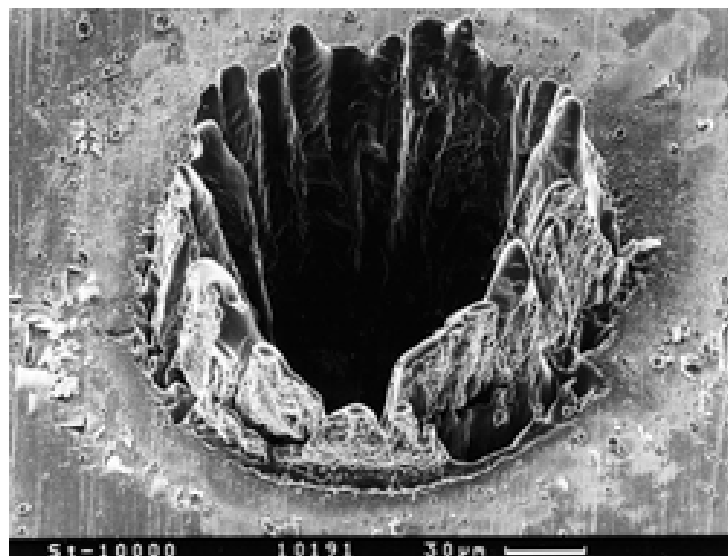


Figura 4.22: Coroa de irregularidade superficial em furo criado por um laser com pulso de duração 4 ns em placa de aço de 100 µm

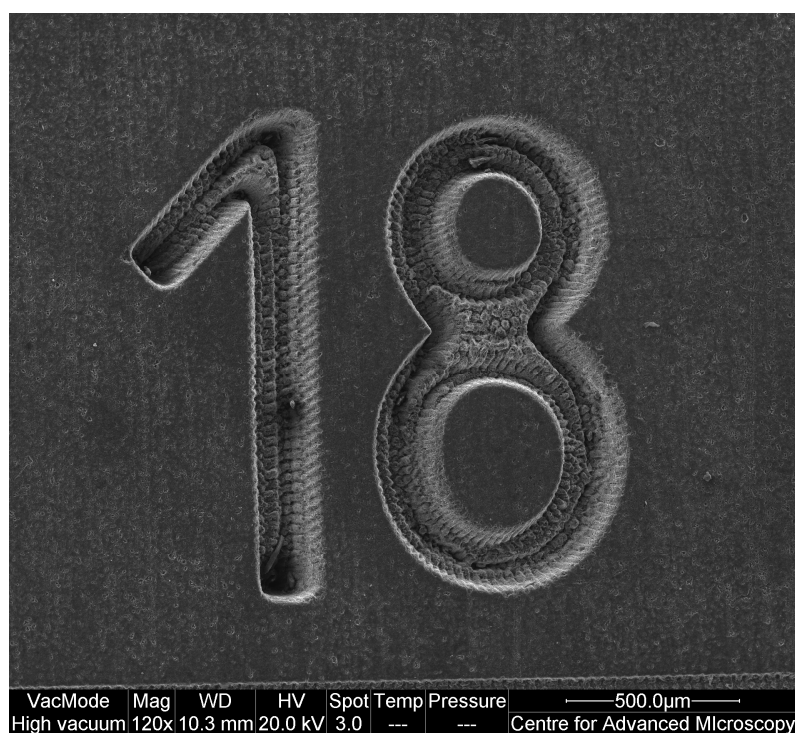


Figura 4.23: Marcação efectuada por acção laser utilizando o sistema Lasertec 40 sobre bloco de grafite EDM3

Uma análise detalhada da rugosidade mostra que, para a grafite EDM1 e EDM3, a rugosidade diminui com o aumento da frequência e diminuição da profundidade de penetração (ver Figuras 4.27 a 4.30). Por outro lado, é igualmente possível observar que o aumento da velocidade de varrimento se traduz num aumento da rugosidade. Efectivamente a velocidade de varrimento é um parâmetro bastante importante no tocante à qualidade nas superfícies maquinadas. À medida que a velocidade de varrimento aumenta, a energia por unidade de área diminui e a profundidade do micro crateras produzidas por remoção de material ao longo da linha laser diminuem também. Contudo, os tempos de processamento são substancialmente aumentados quando se utilizam baixas velocidade de varrimento. Este parâmetro influencia também o grau de sobreposição entre pulsos lasers subsequentes. Quanto menor for a velocidade de varrimento maior é o grau de sobreposição e mais profunda a marcação ou acção laser, fruto de múltiplos pulsos de radiação. Os resultados mostram igualmente que no caso de grafites de maior dureza (o EDM3 é mais duro que o EDM1), para a mesma profundidade de penetração, velocidade de varrimento, frequência e espaçamento entre linhas de varrimento (*hatch*) a rugosidade é menor.

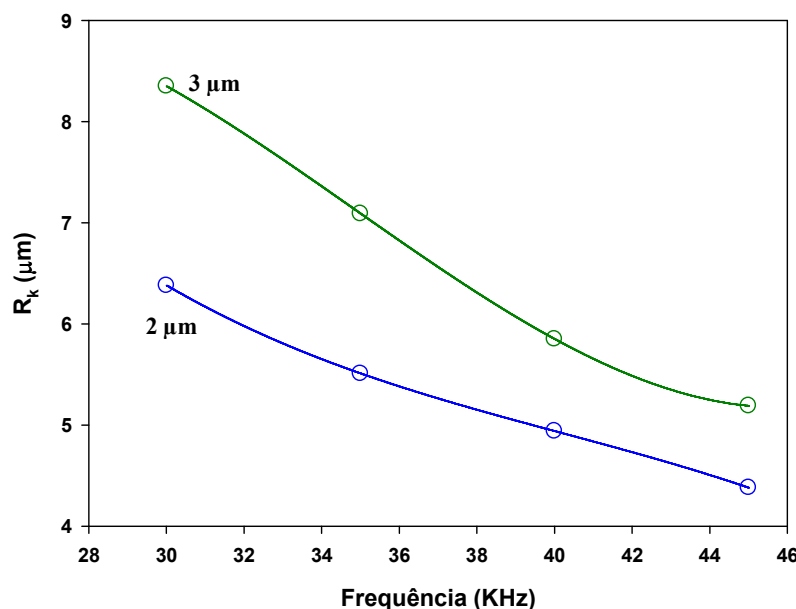


Figura 4.24: Variação da rugosidade (R_k) com a frequência para diferentes profundidades de penetração. Material: EDM1. Velocidade de varrimento: 750 mm/seg

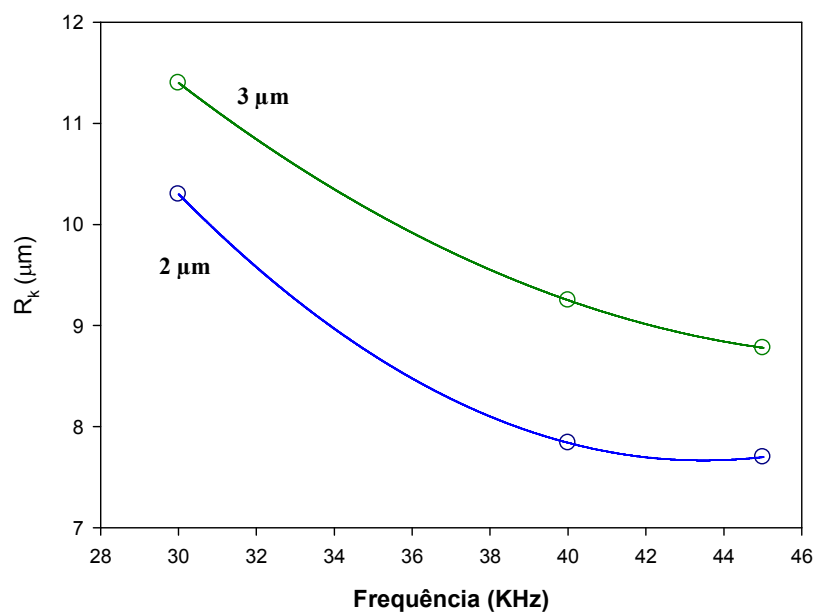


Figura 4.25: Variação da rugosidade (R_k) com a frequência para diferentes profundidades de penetração. Material: EDM1. Velocidade de varrimento: 1250 mm/seg

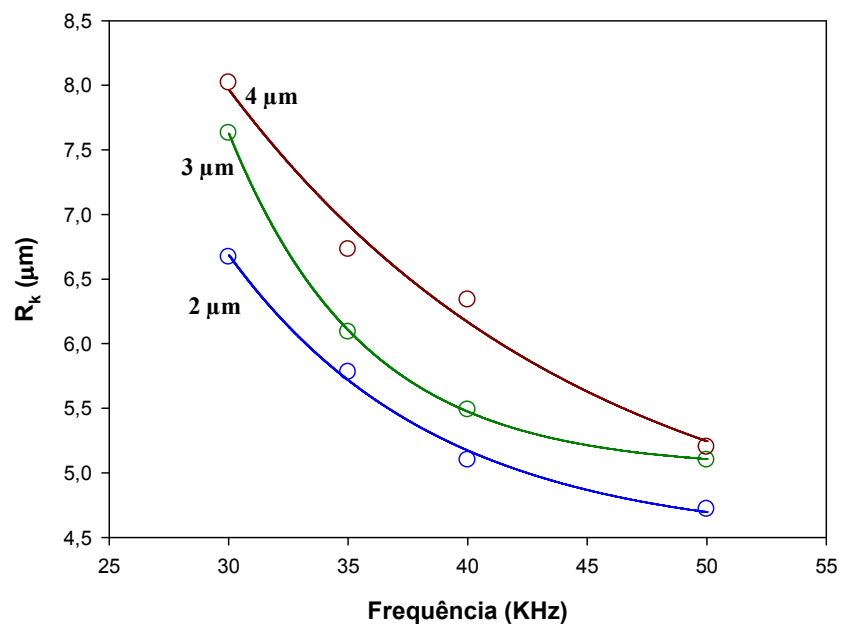


Figura 4.26: Variação da rugosidade (R_k) com a frequência para diferentes profundidades de penetração. Material: EDM3. Velocidade de varrimento: 750 mm/seg

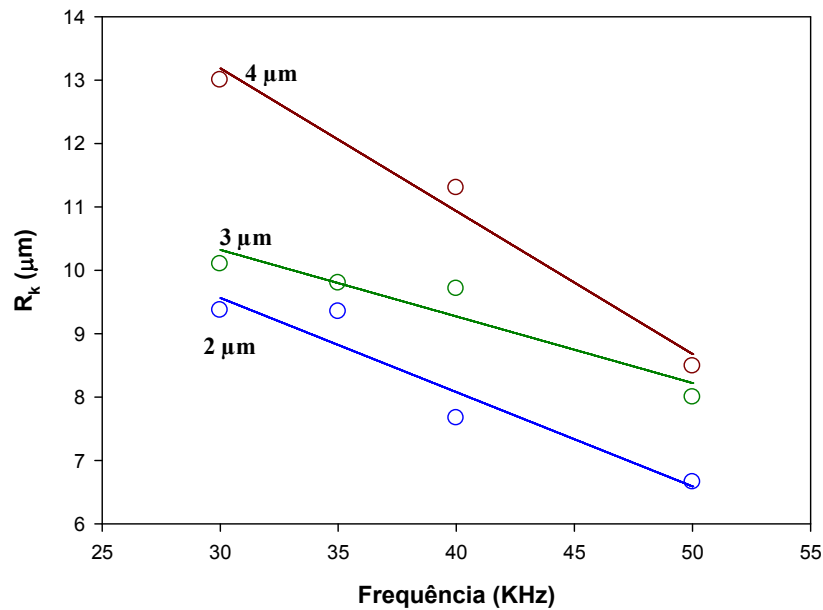


Figura 4.27: Variação da rugosidade (R_k) com a frequência para diferentes profundidades de penetração. Material: EDM3. Velocidade de varrimento: 1250 mm/seg

A tendência observada para o caso da grafite verifica-se igualmente no caso do cobre (Figura 4.31) e titânio (Figura 4.32).

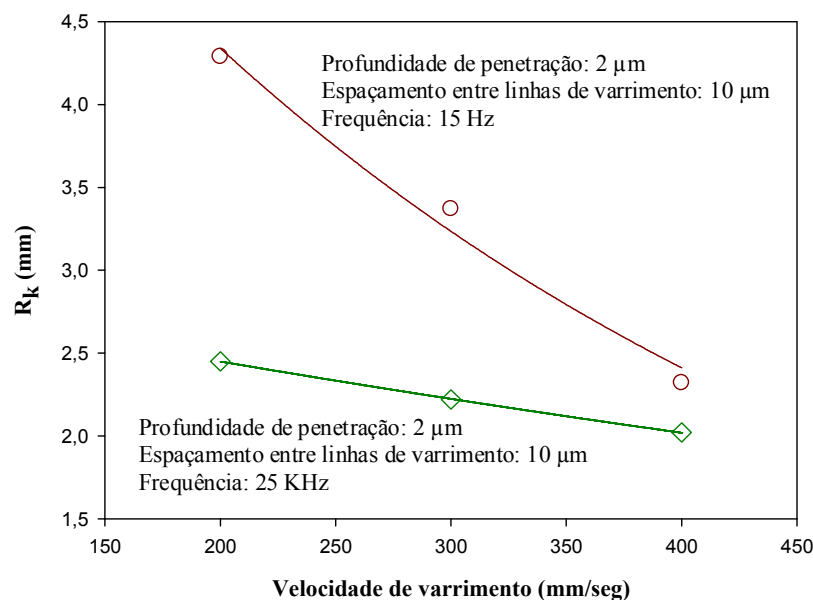


Figura 4.28: Variação da rugosidade (R_k) com a velocidade de varrimento para dois conjuntos diferentes de frequências. Material: cobre

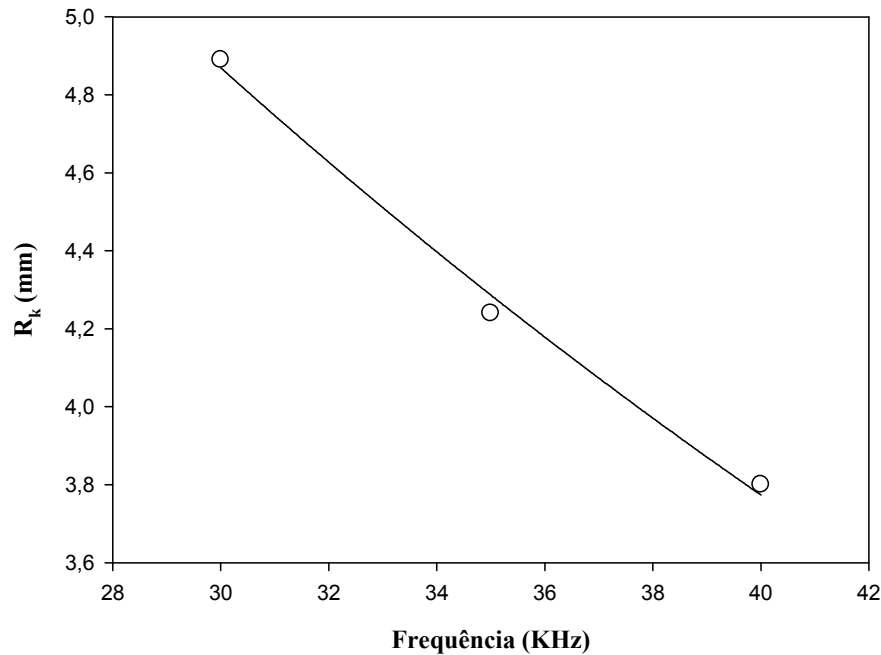


Figura 4.29: Variação da rugosidade (R_k) com a frequência. Material: titânio. Profundidade de penetração: 2 μm . Espaçamento entre linhas de varrimento 10 μm . Velocidade de varrimento 500 mm/seg

As diferenças de rugosidade observadas no caso do cobre e do titânio em função das condições de processamento são igualmente comprovadas por análise das micrografias das diferentes superfícies maquinadas. Na Figura 4.33 é possível verificar, para o caso do cobre, uma maior irregularidade superficial quando se aumenta a velocidade de varrimento mantendo constantes a profundidade de penetração, frequência e distância entre linhas de varrimento.

De forma idêntica, verifica-se para o titânio (Figura 4.34), uma maior irregularidade superficial quando se diminui a frequência, mantendo-se constante as restantes condições de processamento. Nas Figuras 4.35 a 4.38 apresentam-se as micrografias das diferentes superfícies maquinadas (ver Tabela 4.1) e que corroboram os resultados anteriormente apresentados para o efeito que os parâmetros de processamento têm sobre o acabamento superficial. Em várias superfícies é possível observar a existência de pequenas micro cavidades de maior dimensão que se devem por um lado à acção do laser e por outro a irregularidades estruturais do material (Figura 4.39).

Foi ainda possível observar-se a existência de pequenas micro partículas de geometria esférica que resultam de processos de resolidificação do material (Figura 4.40).

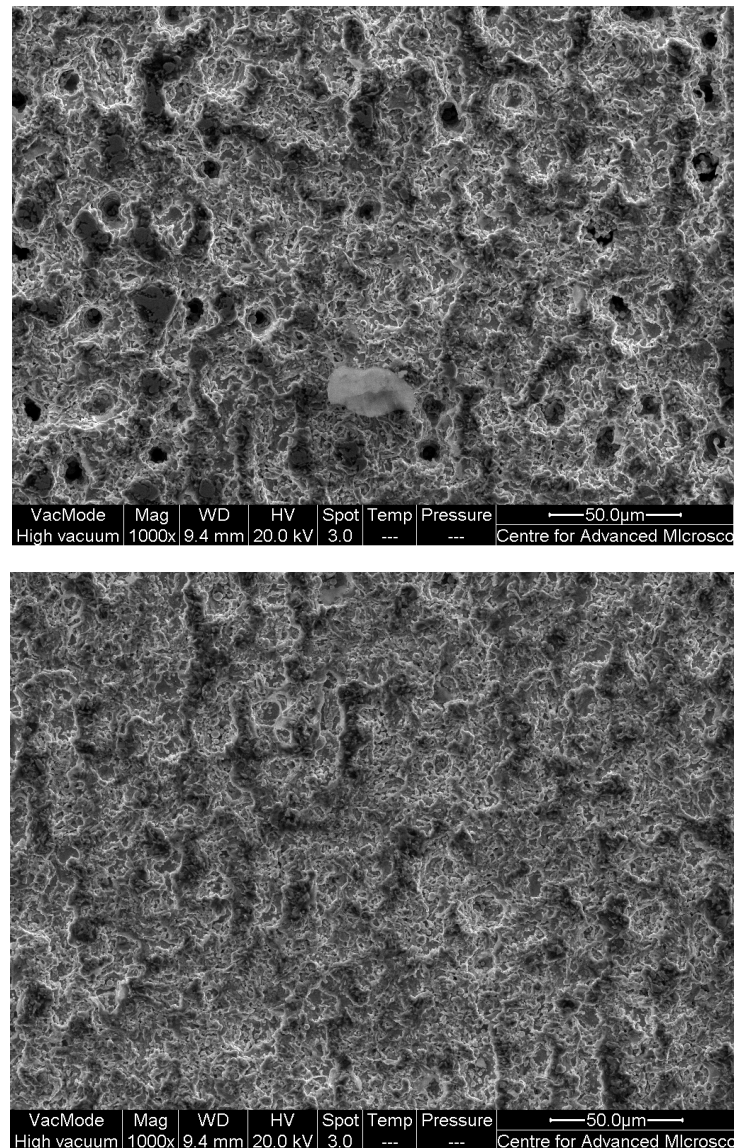


Figura 4.30: Micrografias da superfície maquinada para a) Profundidade de penetração de 2 µm, frequência de 15 KHz, espaçamento entre linhas de varrimento de 10 mm e velocidade de varrimento de 200 mm/seg. b) Profundidade de penetração de 2 µm, frequência de 15 KHz, espaçamento entre linhas de varrimento de 10 mm e velocidade de varrimento de 300 mm/seg. Material: cobre

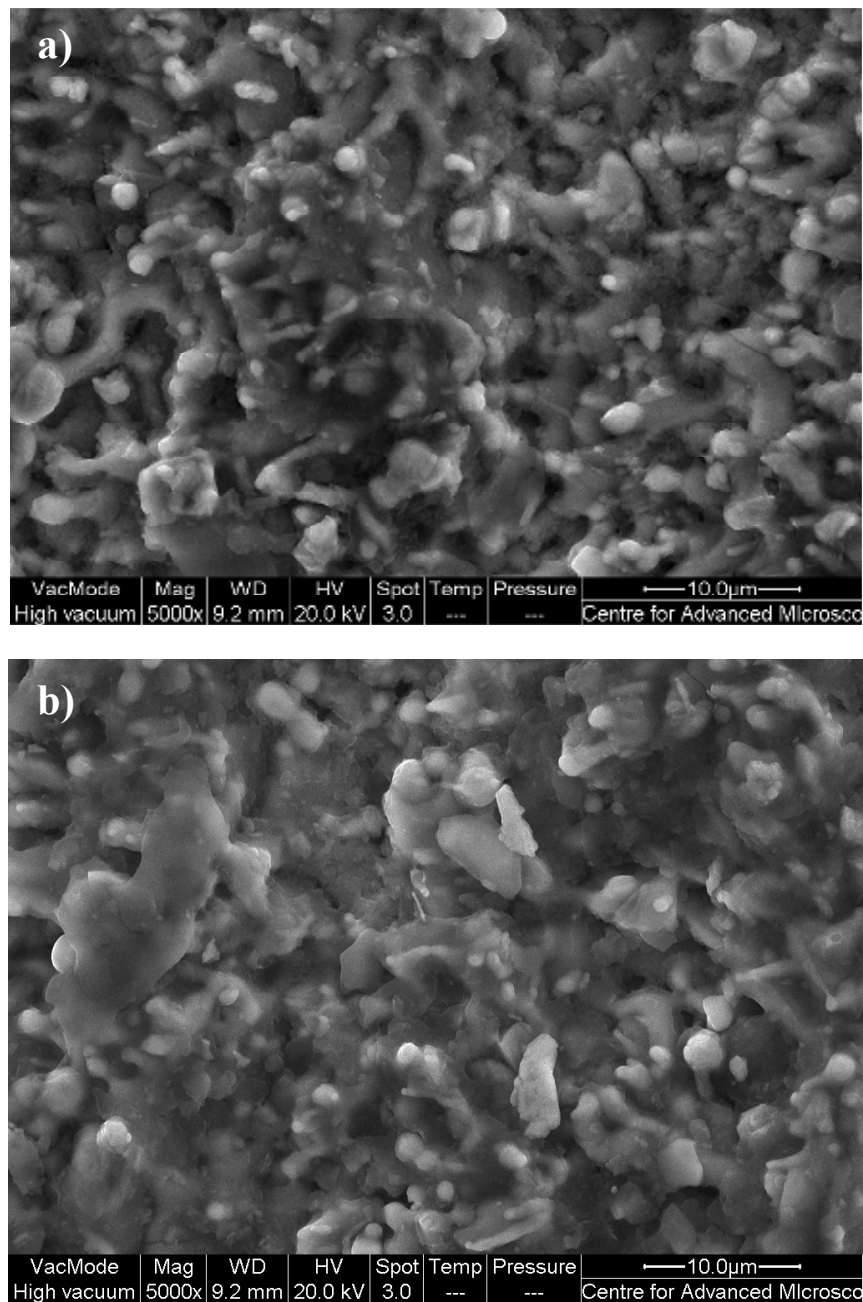


Figura 4.31: Micrografias da superfície maquinada para a) Profundidade de penetração de 2 µm, frequência de 35 KHz, espaçamento entre linhas de varrimento de 10 µm e velocidade de varrimento de 300 mm/seg. b) Profundidade de penetração de 2 µm, frequência de 40 KHz, espaçamento entre linhas de varrimento de 10 µm e velocidade de varrimento de 300 mm/seg. Material: titânio

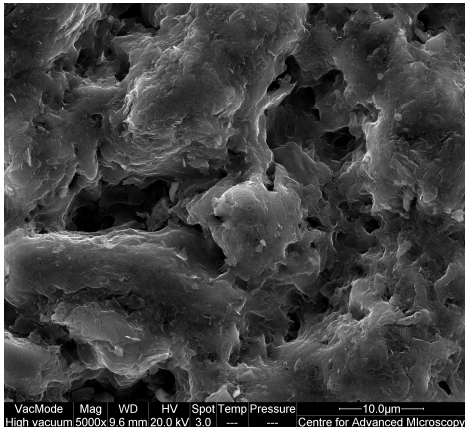
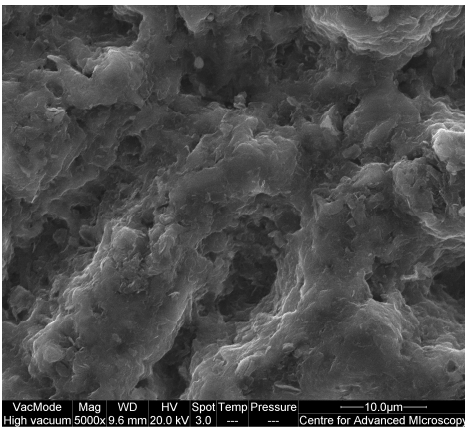
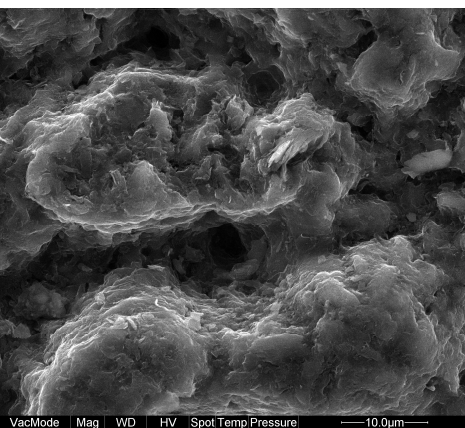
<ul style="list-style-type: none"> • Profundidade de penetração: 2 μm • Espaçamento entre linhas de varrimento: 10 μm • Frequência: 30 KHz • Velocidade de varrimento: 750 mm/seg 	 <p>VacMode Mag WD HV Spot Temp Pressure 10.0um High vacuum 5000x 9.6 mm 20.0 kV 3.0 --- --- Centre for Advanced Microscopy</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Profundidade de penetração: 3 μm • Espaçamento entre linhas de varrimento: 10 μm • Frequência: 30 KHz • Velocidade de varrimento: 750 mm/seg 	 <p>VacMode Mag WD HV Spot Temp Pressure 10.0um High vacuum 5000x 9.6 mm 20.0 kV 3.0 --- --- Centre for Advanced Microscopy</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Profundidade de penetração: 4 μm • Espaçamento entre linhas de varrimento: 10 μm • Frequência: 30 KHz • Velocidade de varrimento: 750 mm/seg 	 <p>VacMode Mag WD HV Spot Temp Pressure 10.0um High vacuum 5000x 9.7 mm 20.0 kV 3.0 --- --- Centre for Advanced Microscopy</p>

Figura 4.32: Morfologia da superfície das cavidades maquinadas em Grafite EDM1 para diferentes condições de processamento

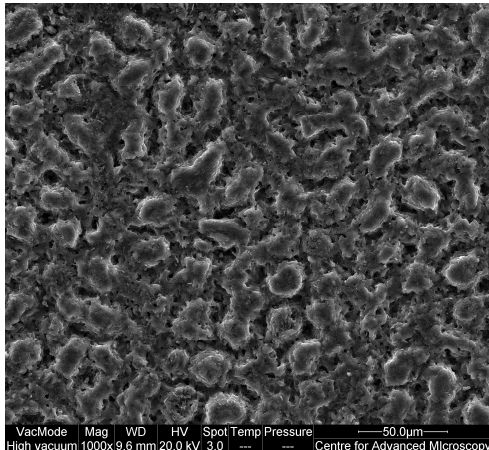
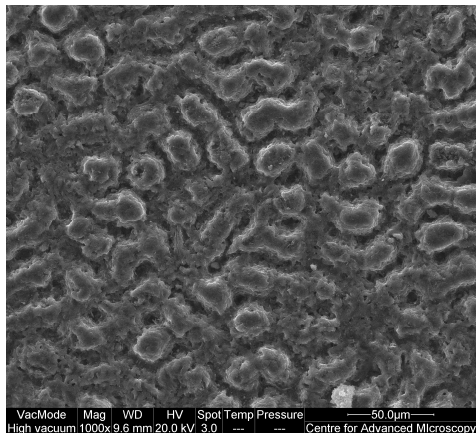
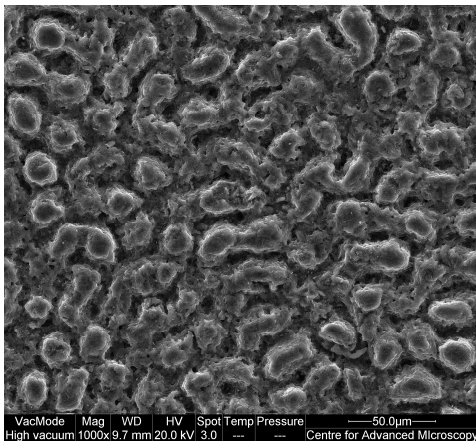
<ul style="list-style-type: none"> • Profundidade de penetração: 2 μm • Espaçamento entre linhas de varrimento: 10 μm • Frequência: 30 KHz • Velocidade de varrimento: 750 mm/seg 	
<ul style="list-style-type: none"> • Profundidade de penetração: 3 μm • Espaçamento entre linhas de varrimento: 10 μm • Frequência: 30 KHz • Velocidade de varrimento: 750 mm/seg 	
<ul style="list-style-type: none"> • Profundidade de penetração: 4 μm • Espaçamento entre linhas de varrimento: 10 μm • Frequência: 30 KHz • Velocidade de varrimento: 750 mm/seg 	

Figura 4.32 (continuação): Morfologia da superfície das cavidades maquinadas em Grafite EDM1 para diferentes condições de processamento

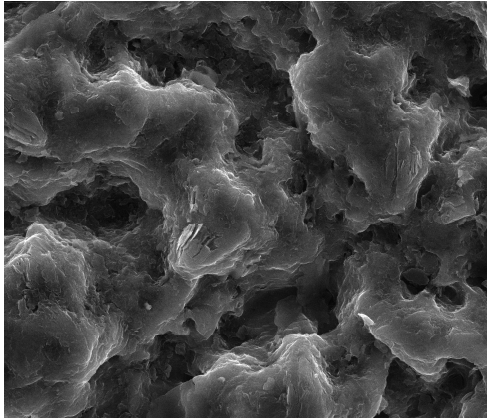
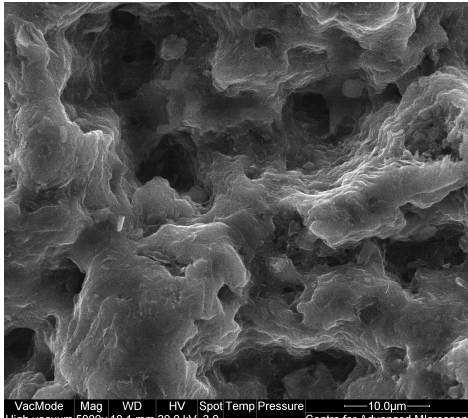
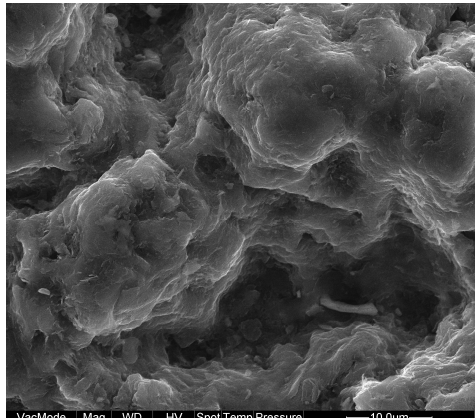
<ul style="list-style-type: none"> • Profundidade de penetração: 2 μm • Espaçamento entre linhas de varrimento: 10 μm • Frequência: 30 KHz • Velocidade de varrimento: 1250 mm/seg 	 <p>VacMode Mag WD HV Spot Temp Pressure 10.0μm High vacuum 5000x 9.5 mm 20.0 kV 3.0 --- --- Centre for Advanced Microscopy</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Profundidade de penetração: 3 μm • Espaçamento entre linhas de varrimento: 10 μm • Frequência: 30 KHz • Velocidade de varrimento: 1250 mm/seg 	 <p>VacMode Mag WD HV Spot Temp Pressure 10.0μm High vacuum 5000x 10.1 mm 20.0 kV 3.0 --- --- Centre for Advanced Microscopy</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Profundidade de penetração: 4 μm • Espaçamento entre linhas de varrimento: 10 μm • Frequência: 30 KHz • Velocidade de varrimento: 1250 mm/seg 	 <p>VacMode Mag WD HV Spot Temp Pressure 10.0μm High vacuum 5000x 9.8 mm 20.0 kV 3.0 --- --- Centre for Advanced Microscopy</p>

Figura 4.33: Morfologia da superfície das cavidades maquinadas em Grafite EDM3 para diferentes condições de processamento

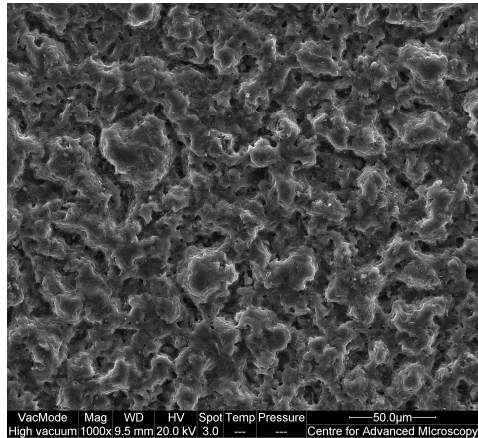
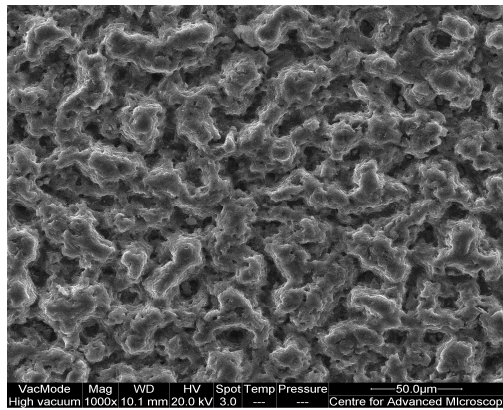
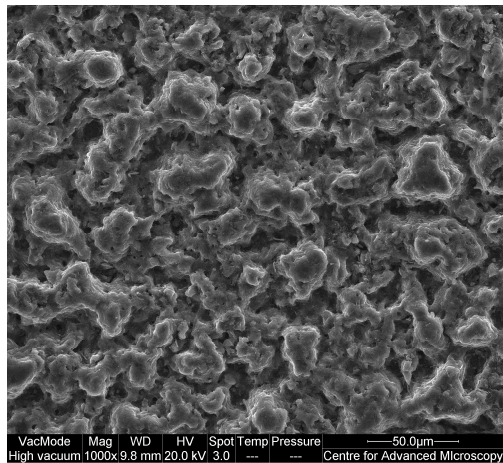
<ul style="list-style-type: none"> • Profundidade de penetração: 2 μm • Espaçamento entre linhas de varrimento: 10 μm • Frequência: 30 KHz • Velocidade de varrimento: 1250 mm/seg 	 <p>VacMode Mag WD HV Spot Temp Pressure 50.0μm High vacuum 1000x 9.5 mm 20.0 kV 3.0 --- --- Centre for Advanced Microscopy</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Profundidade de penetração: 3 μm • Espaçamento entre linhas de varrimento: 10 μm • Frequência: 30 KHz • Velocidade de varrimento: 1250 mm/seg 	 <p>VacMode Mag WD HV Spot Temp Pressure 50.0μm High vacuum 1000x 10.1 mm 20.0 kV 3.0 --- --- Centre for Advanced Microscopy</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Profundidade de penetração: 4 μm • Espaçamento entre linhas de varrimento: 10 μm • Frequência: 30 KHz • Velocidade de varrimento: 1250 mm/seg 	 <p>VacMode Mag WD HV Spot Temp Pressure 50.0μm High vacuum 1000x 9.8 mm 20.0 kV 3.0 --- --- Centre for Advanced Microscopy</p>

Figura 4.33 (continuação): Morfologia da superfície das cavidades maquinadas em Grafite EDM3 para diferentes condições de processamento

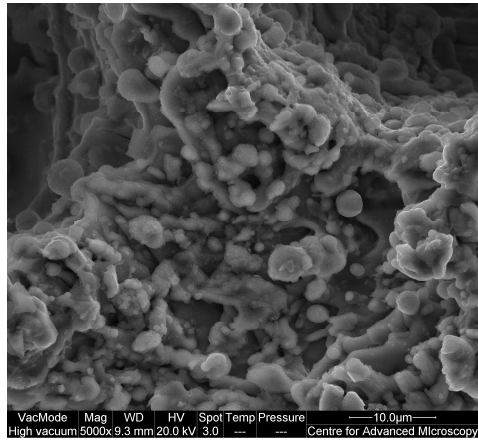
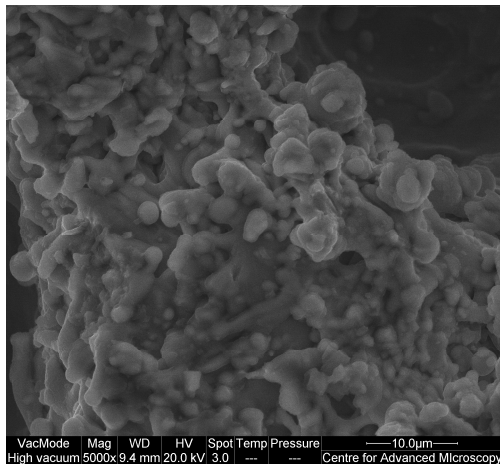
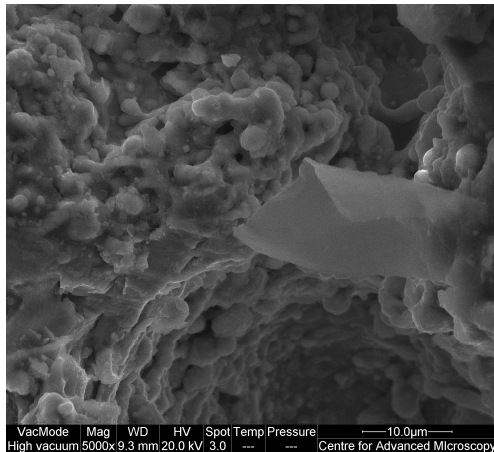
<ul style="list-style-type: none"> • Profundidade de penetração: 4 μm • Espaçamento entre linhas de varrimento: 10 μm • Frequência: 35 KHz • Velocidade de varrimento: 500 mm/seg 	
<ul style="list-style-type: none"> • Profundidade de penetração: 4 μm • Espaçamento entre linhas de varrimento: 10 μm • Frequência: 40 KHz • Velocidade de varrimento: 500 mm/seg 	
<ul style="list-style-type: none"> • Profundidade de penetração: 4 μm • Espaçamento entre linhas de varrimento: 10 μm • Frequência: 45 KHz • Velocidade de varrimento: 500 mm/seg 	

Figura 4.34: Morfologia da superfície das cavidades maquinadas em Titânio para diferentes condições de processamento

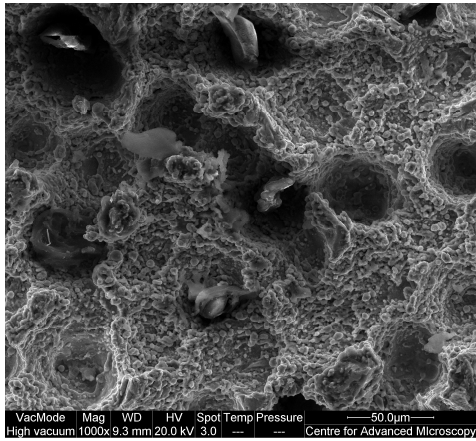
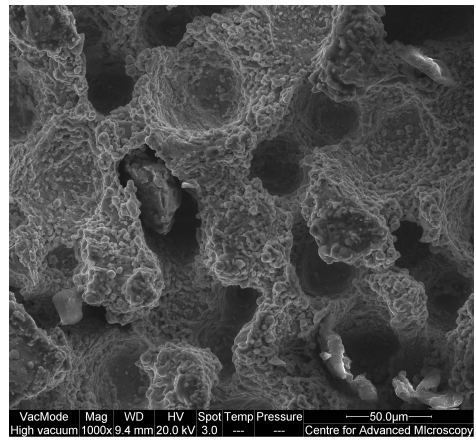
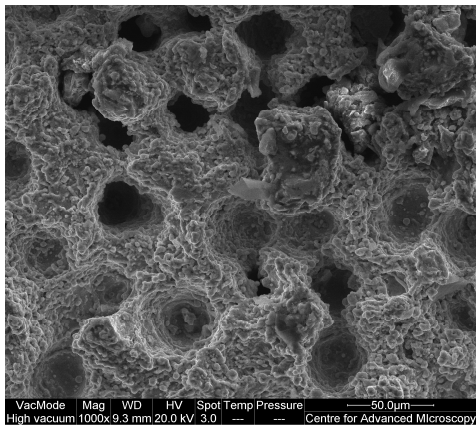
<ul style="list-style-type: none"> • Profundidade de penetração: 4 μm • Espaçamento entre linhas de varrimento: 10 μm • Frequência: 35 KHz • Velocidade de varrimento: 500 mm/seg 	
<ul style="list-style-type: none"> • Profundidade de penetração: 4 μm • Espaçamento entre linhas de varrimento: 10 μm • Frequência: 40 KHz • Velocidade de varrimento: 500 mm/seg 	
<ul style="list-style-type: none"> • Profundidade de penetração: 4 μm • Espaçamento entre linhas de varrimento: 10 μm • Frequência: 45KHz • Velocidade de varrimento: 500 mm/seg 	

Figura 4.34 (continuação): Morfologia da superfície das cavidades maquinadas em titânio para diferentes condições de processamento

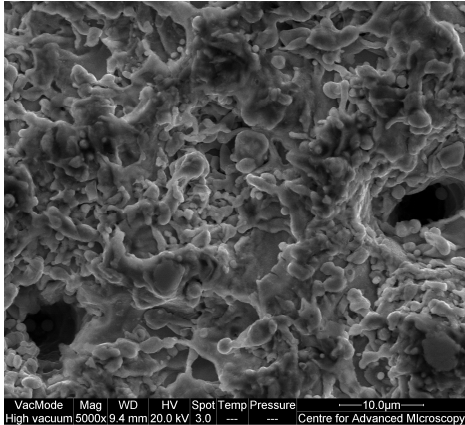
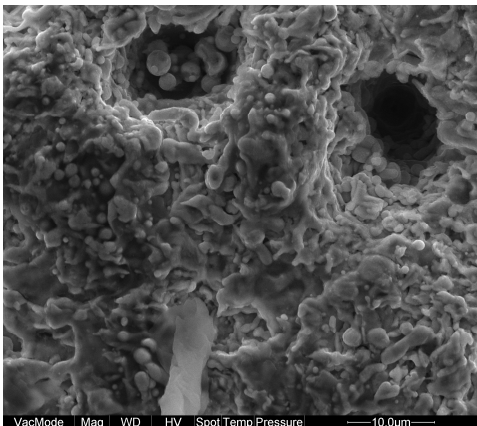
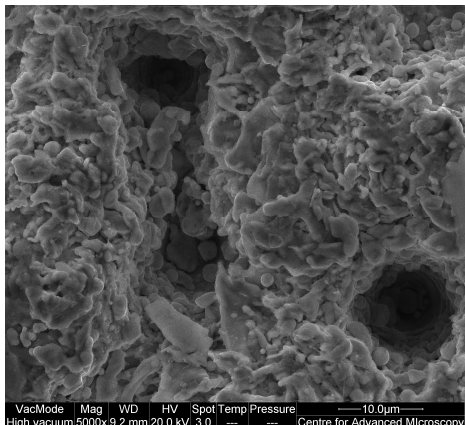
<ul style="list-style-type: none"> • Profundidade de penetração: 2 μm • Espaçamento entre linhas de varrimento: 10 μm • Frequência: 15 KHz • Velocidade de varrimento: 200 mm/seg 	 <p>VacMode Mag WD HV Spot Temp Pressure 10.0μm High vacuum 5000x 9.4 mm 20.0 kV 3.0 --- --- Centre for Advanced Microscopy</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Profundidade de penetração: 3 μm • Espaçamento entre linhas de varrimento: 10 μm • Frequência: 15 KHz • Velocidade de varrimento: 200 mm/seg 	 <p>VacMode Mag WD HV Spot Temp Pressure 10.0μm High vacuum 5000x 9.2 mm 20.0 kV 3.0 --- --- Centre for Advanced Microscopy</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Profundidade de penetração: 4 μm • Espaçamento entre linhas de varrimento: 10 μm • Frequência: 15KHz • Velocidade de varrimento: 200 mm/seg 	 <p>VacMode Mag WD HV Spot Temp Pressure 10.0μm High vacuum 5000x 9.2 mm 20.0 kV 3.0 --- --- Centre for Advanced Microscopy</p>

Figura 4.35 : Morfologia da superfície das cavidades maquinadas em cobre para diferentes condições de processamento

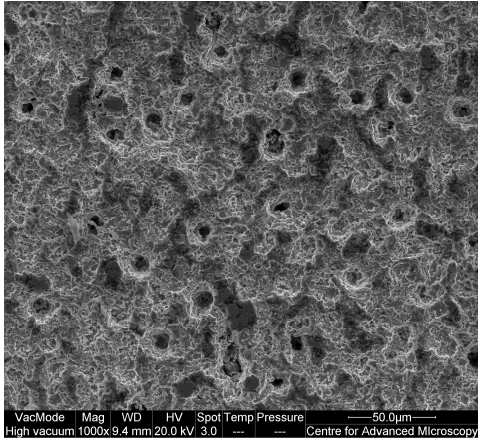
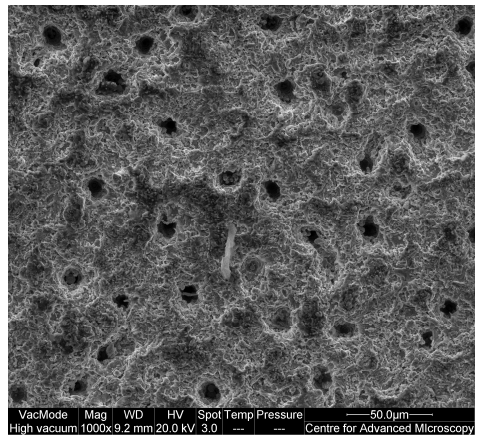
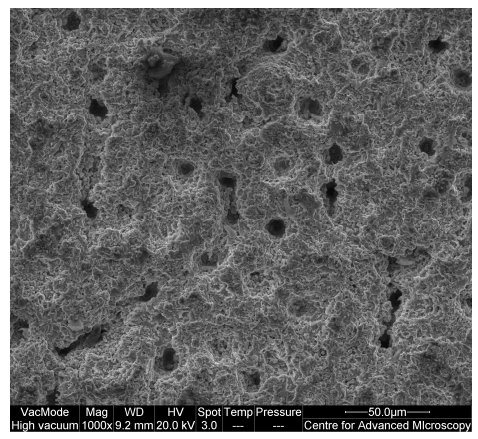
<ul style="list-style-type: none"> • Profundidade de penetração: 2 μm • Espaçamento entre linhas de varrimento: 10 μm • Frequência: 15 KHz • Velocidade de varrimento: 200 mm/seg 	
<ul style="list-style-type: none"> • Profundidade de penetração: 3 μm • Espaçamento entre linhas de varrimento: 10 μm • Frequência: 15 KHz • Velocidade de varrimento: 200 mm/seg 	
<ul style="list-style-type: none"> • Profundidade de penetração: 4 μm • Espaçamento entre linhas de varrimento: 10 μm • Frequência: 15KHz • Velocidade de varrimento: 200 mm/seg 	

Figura 4.35 (continuação): Morfologia da superfície das cavidades maquinadas em cobre para diferentes condições de processamento

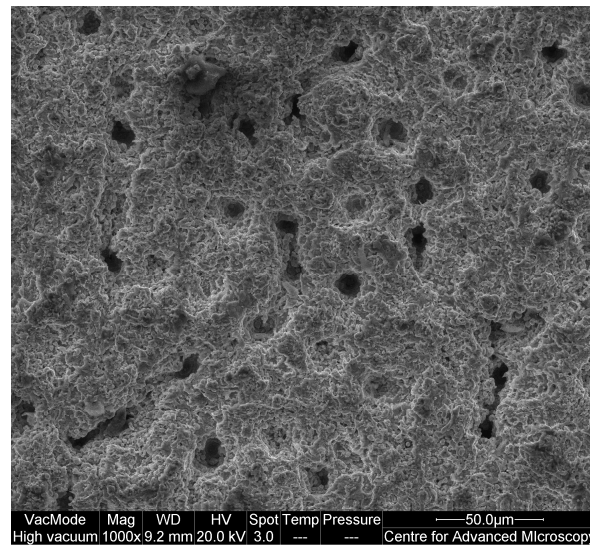


Figura 4.36: Descontinuidade superficial observada para um micro cavidade em cobre maquinada para uma profundidade de 4 μm, espaçamento entre linhas de varrimento de 10 μm, frequência 15KHz e velocidade de varrimento de 200 mm/seg

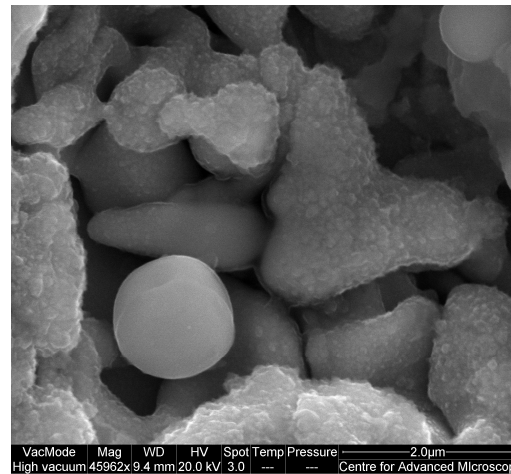
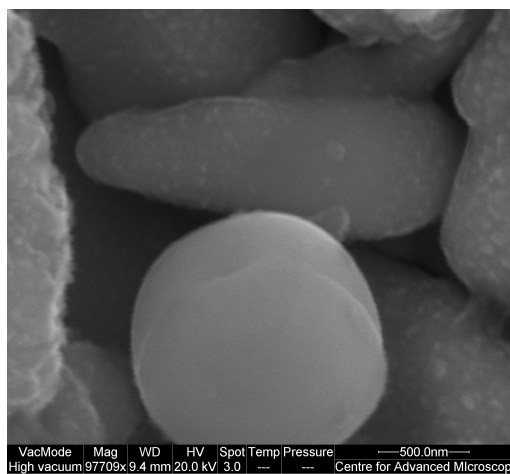


Figura 4.37: Partículas esféricas resultantes da resolidificação de material numa micro cavidade em cobre obtida através uma profundidade de 3 μm, espaçamento entre linhas de varrimento de 10 μm, frequência 15KHz e velocidade de varrimento de 200 mm/seg

Capítulo 5: Conclusões e trabalho futuros

A remoção de material por meio de raios laser colocou à disposição dos fabricantes de ferramentas e de moldes um novo processo de maquinação. Depois de em 1989 ter sido apresentado á indústria a primeira máquina de remoção de material por laser designada LASERCAV, constituíram-se as primeiras máquinas de produção que se instalaram em empresas da Europa, Estado Unidos e Japão. As experiências iniciais resultantes dos trabalhos realizados por estas empresas mostraram ser possível maquinar materiais bastante duros e não condutores de electricidade. Podem também fabricar-se eléctrodos para erosão convencional. Desde a sua introdução inicial, os sistemas de maquinação laser por remoção conheceram um significativo desenvolvimento tecnológico. Não obstante esta tecnologia, só recentemente foi introduzida em Portugal. O primeiro sistema de micro fresagem laser para ambiente industrial foi adquirido pela empresa Famolde em 2006 no âmbito de um projecto de investigação financiado pela agência de inovação.

Sendo uma tecnologia recente em Portugal, mas cujo interesse tem vindo a ser patenteado no âmbito da Rede de Excelência de Micro Fabricação CEMICRO, torna-se importante a realização de estudos que permitam avaliar o efeito da s condições de processamento em termos da qualidade dos componentes produzidos e da rapidez de produção. Tal como acontece nos processos convencionais de fresagem e erosão, a espessura da camada de material removida é determinada pela variação de parâmetros de processamento podendo-se, tal como acontece nestes processos, obter taxas de remoção de material bastante elevadas.

Esta tese, realizada em ambiente industrial e em estreita colaboração com os técnicos da empresa Famolde, visou contribuir para o conhecimento de janelas de processamento adequadas a um conjunto de materiais utilizados industrialmente. Depois de um conjunto de testes experimentais realizados com materiais mais

vulgares na indústria de moldes para aprendizagem sobre o modo de funcionamento do equipamento de micro fresagem laser considerado nesta dissertação, procedeu-se à realização de testes com grafite, cobre e titânio como forma de se avaliar o efeito dos parâmetros de processamento sobre as taxas de remoção de material e o acabamento superficial das superfícies maquinadas. Os resultados obtidos mostram que :

- O aumento da profundidade de penetração conduz a um aumento da taxa de remoção de material verificando-se para alguns dos materiais estudados (Grafites, Cobre e Titânio) a existência de um valor crítico a partir da qual o aumento de frequência para a mesma profundidade de penetração diminui. Este efeito é particularmente importante quando se aumenta a velocidade de varrimento.
- A taxa de remoção aumenta com a frequência, tendo-se observado a existência de um valor a partir do qual o aumento da frequência se traduz num aumento mais significativo da taxa de remoção.
- Quando se utilizam materiais com maior dureza, maior resistência á compressão e flexão e maior resistividade eléctrica, para a mesma frequência, velocidade de varrimento e profundidade de penetração, os da taxa de remoção são menores.
- Para a mesma profundidade de penetração, frequência e velocidade de varrimento o aumento de espaçamento entre passagens do feixe laser traduz-se num aumento da taxa de remoção de material.
- Para um valor de frequência mais baixo e uma maior profundidade de penetração, a taxa de remoção de material é superior.
- As micro cavidade produzidas apresentam todas uma boa definição de fronteira (ausência de bordos sem cristas), o que se deve a uma rápida transferência de energia para a peça fazendo com que a maioria do material sob a acção do laser seja directamente vaporizada sem transferência de calor para as regiões vizinhas.
- O aumento da frequência e a diminuição da profundidade de penetração traduz-se numa diminuição da rugosidade.

- A velocidade de varrimento condiciona de forma significativa a qualidade superficial. Este parâmetro determina o grau de sobreposição entre pulsos, verificando-se que, quanto menor for a velocidade de varrimento maior é o grau de sobreposição e mais profunda a marcação laser.
- Para a mesma velocidade de varrimento e profundidade penetração, o aumento da frequência traduz-se numa diminuição da rugosidade.

Os resultados obtidos com este trabalho preliminar permitiram melhorar o conhecimento ao nível do microfabrico laser. Este trabalho permitiu igualmente reforçar o nível de conhecimento da empresa Famolde. Contudo pretendem-se desenvolver de futuro novos trabalhos que visam alargar ainda mais o conhecimento científico neste domínio tecnológico e também otimizar procedimentos. Assim, pretende-se realizar estudos mais alargados em termos de gamas de velocidades de varrimento, e frequências e avaliar-se também o efeito da variação da potência sobre aspectos relacionados com a taxa de remoção e a qualidade superficial. Este estudo será igualmente alargado a outros materiais nomeadamente, materiais cerâmicos. Ao nível da grafite pretende-se avaliar o desempenho de micro eléctrodos obtido por micro fresagem laser com micro eléctrodos obtido por outros processos de micro fabricação. Será igualmente importante avaliar-se futuramente o efeito que os diferentes parâmetros de processamento têm ao nível das tensões residuais criadas sobre as peças maquinadas. Finalmente e como forma de se minimizar o trabalho experimental que qualquer novo processo requer será importante o desenvolvimento de uma ferramenta computacional que descreva de forma correcta a interacção luz matéria permitindo simular o processo de micro fresagem laser e otimizar os parâmetros de processamento a utilizar para cada aplicação.

Referências

- Bártolo, P.J. (2008), "Market opportunities in micro applications/technologies", CEMICRO Day, Centimfe, 26 de Junho
- Beluze, L., Bertsch, A. E Renaud, P. (1999), "Microstereolithography: a New process to build complex 3D objects", Proc. of SPIE, Vol 3680, 808
- Bertsch, A., Zissi, S., Jézéquel, J. Y., Corbel, S. e André, J. C (1997) "Microstereophotolithography using a liquid crystal display as dynamic mask-generator", *Microsystem Technologies*, 42-47
- Bertsch, A., Lorenz, H., Renaud, P.(1999)," 3D microfabrication by combining microstereolithography and thick resist UV lithography", *Sensors and Actuators* 73, 14-23
- Bertsch, A., Jiguet, S., Bernhards, P., Renaud, P.(2003)," Microstereolithography a review", *Materials Research Society Symposium Proceedings* 758, LL1.1.1, 13
- Bird, J. e Ross, C.T. (2002), "Mechanical engineering principles", Newns, Oxford
- Bischofberger, R., Zimmerman, H., Staufert, G.,(1997)" Low-Cast HARMS Process; *Sensors and Actuators AS1*", 392-399
- Corbett, J., McKeown, P.A., Peggs, G.N. e Whatmore, R. (2000), "Nanotechnology: International developments and emerging products, *Annals of the CIRP*, 49(2), 523–546
- Cremers, C., Bouarnrane, F., Singleton, L., Schenk, R, (2001)," SU-8 as resist material for deep X-ray lithography", *Microsystem Technologies* 7, 11-16
- Deckard, C. R. (1986) "Method and apparatus for producing parts by selective sintering", US Patent 4 863 538.
- Ehmann, K.F., Bourell, D., Culpepper, M.L., Kurfess, T.R., Madou, M., Rajurkar, K. e DeVor, R.E. (2005), "International Assessment of Research and Development in Micromanufacturing", Final Report, World Technology Evaluation Center (WTEC), USA
- Friedrich, C., Vasile, M. (1996)," The micromilling process for high aspect ratio microstructures", *Microsystem Technologies* 2, 144-148

Fudim, E. V. (1987) "Method and apparatus for production of three-dimensional objects by photosolidification", US Patent 4 801 477.

Fudim, E. V. (1988) "Apparatus for production of three-dimensional objects by photosolidification", US Patent 5 135 379.

Glezer, E. N., Milosavljevic, M., Huang, L., Finlay, R. J., Her, T. H., Callan, J.P. & Mazur, E. (1996), "Three-dimensional optical storage inside transparent materials", *Optics Letters* 21 (24), 2023-2025

Hornes, J., Göttert, J., Lian K., Desta Y., Jian L. (2003), "Materials for LIGA and LIGA-based Microsystems", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 199, 332-341

Hull, C.W., Spence, S.T., Lewis, C.W., Vison, W.A. e Smalley, D.R. (1989), "Method of and apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography with reduced curl", US Patent 5 104 592

Hull, C.W. (1986), "Method and apparatus for production three-dimensional objects by stereolithography", EU Patent 0 171 069.

Hull, C.W. (1984), "Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography", US Patent 4 575 330

Ikuta, K. e Hirowatari, K. (1993a) "Real three-dimensional microfabrication using stereo lithography and metal molding", *Proceedings of the IEEE international Workshop on MicroElectro Mechanical Systems (MEMS '93)*, 42-47.

Ikuta, K., Maruo, S. e Kojima, S. (1993b) "New microstereolithography for freely movable 3D microstructure", *Proceedings of the IEEE international Workshop on Micro Electro Mechanical systems (MEMS '93)*, 290-295.

Kalpakjian, S. (2001), "Manufacturing Engineering technology", Prentice Hall

Löhe, D. e Haußelt, J. (2005) "Microengineering of metals and ceramics. Part II: Special replication techniques, automation and properties", Wiley, Weinheim

Lu, Z., Yoneyama, T. (1999), "Micro cutting in the micro lathe turning system", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 39, 1171-1183
Maruo, S., Nakamura, O. & Kawata, S. (1997), "Three-dimensional microfabrication with two-photon-absorbed photopolymerization", *Optics Letters* 22 (2), 132-134

Masuzawa, T. e Tonshoff, H.K. (1997), "Three-dimensional micromachining. by machine tools", *Annals of the CIRP*, 46(2), 621-628

McGeough, J. (2002), "Micromachining of engineering materials", Marcel Dekker, Nova York

Milton, G.E. (2006), "Na automated micro-grindig system for the fabrication of precision micro-scale proples", PhD Thesis, The University of New South Wales, UK

Minam,2008 CAP 1

Munnik, F., Benninger, F., MitHalow, S., Bertsch, A.,Renaud, P., Lorenz, H., Grnur, M.,(2003)," High aspect ratio 3D structuring of photoresist materials by ion beam LIGA Microelectronic Engineering", 67-68, 96 103

Nasrullah, J.(2004), "Chemistry of photoresist materials and photolithographic process – Recent developments"

NEXUS III Report, 2005

Ohmori, H.,K, Uehara, Y., Lin, W., 2003, ELID-Grinding of Microltol and Applications to Fabrication of Microcomponents, International Journal of Materials and Product Technology, 18/4-6:498-508

Petsch, T., Regenfuß, P., Ebert, R., Hartwig, L., Klötzer, S., Brabant, Th., Exner, H.(2004)," Industrial laser micro sintering", *Proceedings of the 23rd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics 2004*

Rajurkar, K.P., Levy, G., Malshe, A., Sundaram, M.M., McGeough, J., Hu, X., Resnick, R., DeSilva, A. (2006), "Micro and nano machining by electro-physical and chemical processes", Annals of the CIRP, 55/2

Rajurkar, K.P. e Yu, Z.Y. (2000), "3D micro-EDM using CAD/CAM", Annals of the CIRP, 55/2, Annals of the CIRP, 55/2, 127-130

Saeta, P., Wang, J. K., Siegal, Y., Bloembergen, N. & Mazur E. (1991), "Ultrafast electronic disordering during femtosecond laser melting of GaAs", *Physical Review Letters* 67 (8), 1023-1026

Smalley, D.R. (1988), "Methods and apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography", US Patent 5 015 424

Sommer, C. e Sommer, S. (2005), "Complete EDM handbook", Advance Publishing

Swainson, W.K. (1977), "Method, médium and apparatus for producing three dimensional figure product", US Patent 4 238 840

Swainson, W.K., S.D. Kremer (1975), "Three dimensional systems", US Patent 4 078 229

Swainson, W.K. e S.D. Kramer (1982), "Method and media for accessing data in three dimensions", US Patent 4 471 470

Swainson, W.K. e S.D. Kramer (1981), "Three-dimensional patterned media", US Patent 4 466 080

Takagi, T. e Nakajima, N. (1993) "Photoforming applied to fine machining", Proceedings of the 4th International symposium on Micro Machine and Human Science (MHS'93), 173-178.

Vasco, J., André.N, Bártoło P.(2005),"Micro-fabrication-The state-of-the-art", Proceedings of The 2nd International Conference on Advanced Research on Virtual and Rapid Prototyping, 483-490

Vasco, J. (2006), "A Micro-fabricação Aplicada ao Processo de Micro-injecção", Tese de Mestrado, Universidade do Minho, Portugal

Zhang, X., Jiang, X. N. e Sun, C.(1998) "Micro-stereolithography for MEMS", Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) ASME 66, 3-9.